

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování
Odbor Reverzního inženýrství a aditivních technologií

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design
Department of Reverse engineering and additive technologies

Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů

[Dizertační práce]
[PhD Thesis]

Autor práce: **Ing. Tomáš Koutecký**
Author



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

AUTOMATICKÉ GENEROVÁNÍ POZIC OPTICKÉHO SKENERU PRO DIGITALIZACI PLECHOVÝCH DÍLŮ

AUTOMATIC GENERATION OF SCANNING POSITIONS FOR SHEET METAL PARTS
DIGITIZATION

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ KOUTECKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. JAN BRANDEJS, CSc.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem metodiky pro automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů na základě počítačového modelu měřeného dílu. Výroba a s tím související inspekce plechových dílů jsou velmi úzce spojeny s automobilním průmyslem. Kvůli obecným zvyšujícím se nárokům na přesnost je v sériové výrobě kladen požadavek na přesnou kontrolu vyráběných dílů. K tomu se stále častěji začínají využívat optické 3D skenery a průmyslové roboty. V případě zavedení výroby nového dílu a jeho automatické kontroly v procesu sériové výroby je nutné připravit pozice měření, ze kterých dojde k přesné a rychlé digitalizaci dílu pro následnou inspekci. Příprava těchto pozic probíhá nejčastěji ručním uvedením robota do daných pozic a jejich uložení. Navržená metodika řeší přípravu pozic automaticky. V práci je představena metodika návrhu pozic měření, jejich simulace na skutečnou viditelnost části dílu pomocí osvětlovacího modelu a simulace vygenerovaných pozic na dostupnost robota. Metodika byla zpracována jako plugin pro software Rhinoceros. Na základě experimentálního ověření bylo zjištěno, že dojde ke značné časové úspoře v přípravě pozic měření v porovnání s jejich ruční přípravou.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D skenování, automatizace, plechové díly, automobilní průmysl, průmyslový robot, plánování snímání, osvětlovací model

ABSTRACT

This thesis deals with the development of a new methodology for automatic generation of scanning positions based on a computer model of the part for digitization of sheet metal parts. Manufacture and related inspection of sheet metal parts are closely connected to automotive industry. Based on increasing general requirements on accuracy, there is also a requirement for accurate inspection of manufactured parts in serial-line production. Optical 3D scanners and industrial robots are used more often for that purpose. Measuring positions for accurate and fast digitization of a part need to be prepared as the manufacturing of the new part begins. Planning of such positions is done manually by positioning of the industrial robot and saving the positions. The planning of positions proposed by this methodology is done automatically. A methodology of positions planning, their simulation for true visibility of the part elements using reflectance model and a simulation of the positions for robot reachability is presented in this thesis. The entire methodology is implemented as a plug-in for the Rhinoceros software. High reduction of time in positions planning compared to the manual approach was observed in the performed experiments.

KEY WORDS

3D scanning, automation, sheet metal parts, automotive industry, industrial robot, sensor planning, reflectance model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUTECKÝ, T., *Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 131 s. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele doc. Ing. Jana Brandejse CSc.

V Brně dne:

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval svému školiteli doc. Janu Brandejsovi a především pak doc. Davidu Palouškovi za vedení, rady a připomínky při vypracovávání dizertační práce a v celém průběhu studia. Rád bych také poděkoval svým rodičům za podporu při studiu a bratru Martinovi za cenné matematické rady.

V Brně dne

OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	14
2.1 Inspekční měření	14
2.1.1 Inspekce založená na CAD modelu a její problémy	14
2.1.2 Fáze inspekčního měření	15
2.2 Prostorové digitalizační metody	16
2.2.1 Dělení digitalizačních metod	16
2.2.2 Popis metody proužkové projekce	16
2.3 Porovnání měřicích metod pro získání inspekčních dat	18
2.3.1 Srovnání přesnosti a rychlosti měřicích metod	18
2.3.2 Porovnání měření pomocí CMM a laserového skeneru	18
2.3.3 Porovnání měření pomocí CMM a skeneru s proužkovou projekcí	19
2.3.4 Norma pro stanovení přesnosti optických skenerů	21
2.4 Plánování snímání	21
2.4.1 Segmentace povrchu dílu a prostoru možných pohledů	23
2.4.2 Mapy viditelnosti	25
2.5 Automatizace v přípravě měřicích pozic	26
2.5.1 Automatizace přípravy pozic měření u CMM	27
2.5.2 Automatizace přípravy pozic měření u laserových skenerů	28
2.5.3 Automatizace přípravy pozic měření u skenerů s proužkovou projekcí	30
2.5.4 Automatizované fotogrammetrické měření plechových dílů	33
2.5.5 Automatizace přípravy pozic měření od firmy GOM	34
2.6 Metody redukce odlesků	37
2.6.1 Snímky s vysokým dynamickým rozsahem (HDR)	37
2.6.2 Změna promítaného světelného vzoru	40
2.7 Zmatňování lesklých povrchů	41
2.8 Osvětlovací modely	43
2.8.1 Osvětlovací modely využívané v úlohách počítačového vidění	44
2.8.2 BRDF	44
2.8.3 Osvětlovací modely v inspekčních systémech	45
2.8.4 Sledování paprsku (ray tracing)	47
3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	49
4 VYMEZENÍ CÍLŮ	50
5 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ	51
5.1 Experimentální stanovení neznámých parametrů skenování	51
5.1.1 Stanovení parametrů použité optiky	51
5.1.2 Stanovení parametrů osvětlovacího modelu	52
5.1.3 Stanovení rozsahu hodnot šedé pro korektní dekodování	56
5.2 Návrh metodiky a její implementace v navrženém softwaru	58
5.2.1 Diagram navržené metodiky řešení problému	60
5.2.2 Reprezentace měřeného dílu	61
5.2.3 Segmentace měřeného dílu	62
5.2.4 Návrh pozic měření	65

5.2.5	Výpočet možných pozic měření	68
5.2.6	Způsob hodnocení navržených orientací pro měření	70
5.2.7	Kontrola dostupnosti robota.....	71
5.2.8	Simulace pozic měření	76
5.2.9	Hledání nejkratší cesty robota.....	80
5.2.10	Generování kódu pro řízení robota	81
5.3	Experimentální ověření navržené metodiky.....	83
5.3.1	Měřicí aparatura	83
5.3.2	Měřené vzorky a použité modely.....	84
5.3.3	Návrh hodnocení navržené metodiky v porovnání s ruční přípravou pozic	87
5.3.4	Návrh hodnocení shody simulovaných a reálných pozic měření	88
5.3.5	Návrh hodnocení míry shody naskenované plochy	90
5.3.6	Návrh hodnocení zaznamenání polygonů segmentů	93
6	ANALÝZA A INTERPRETACE	95
6.1	Srovnání ruční přípravy pozic robota a automatizovaného přístupu	95
6.1.1	Porovnání času přípravy měřicích pozic.....	96
6.1.2	Porovnání počtu vygenerovaných měřicích pozic	96
6.1.3	Zhodnocení kompletnosti naskenovaných dat.....	96
6.1.4	Vliv hustoty polygonální sítě.....	98
6.2	Zhodnocení shody simulovaných pozic s reálnými	98
6.2.1	Porovnání poloh středů snímků	99
6.2.2	Porovnání velikostí snímků	101
6.3	Zhodnocení shody naskenované plochy v simulaci a v měření	102
6.3.1	Posouzení vlivu použití skenovaného modelu místo CAD modelu ..	103
6.3.2	Posouzení vlivu hustoty polygonální sítě	104
6.3.3	Posouzení vlivu osvětlovacího modelu.....	105
6.4	Zhodnocení zaznamenání polygonů segmentů	106
6.5	Zhodnocení navržené metodiky	108
6.5.1	Metoda segmentace.....	108
6.5.2	Výpočet map viditelnosti	109
6.5.3	Počet pozic měření (a možnosti jeho snížení)	109
6.5.4	Osvětlovací model	109
6.5.5	Referenční body na dílu	111
6.5.6	Přesnost ustavení fyzického dílu.....	111
6.5.7	Řízení robota.....	111
7	ZÁVĚR	112
	LITERATURA.....	114
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A ZNAČEK.....	122
	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	124
	SEZNAM TABULEK.....	127
	PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	128
	SEZNAM PŘÍLOH.....	129

1 ÚVOD

1

Inspekce je proces, který se vyskytuje téměř ve všech oblastech lidské činnosti a během kterého se posuzuje, zda se daný produkt (objekt) odchyluje od zadaných specifikací [1]. K ověření splnění daných specifikací se využívají různé druhy měření, porovnání, testů a zkoušek. Inspekce může být kvalitativní nebo kvantitativní, posuzuje se, zda je produkt v očekávaném stavu (ano/ne; jak moc se od něj liší) nebo počtu.

V oblasti výroby strojních součástí se pak kromě vizuální kontroly myslí inspekci především kontrola dílů z hlediska dodržení požadovaných rozměrů a geometrie. K takové kontrole se používají nástroje a zařízení využívající dotyku s měřeným dílem: posuvná měřítka, hloubkoměry, elektronické mikrometry, úchylkoměry nebo zařízení pro měření souřadnic (CMM = Coordinate Measuring Machine). Nověji se používají zařízení obecně nazývaná skenery, která zjišťují měřené hodnoty bezkontaktně. Skenery pracují nejčastěji na principu promítání laserového paprsku nebo proužkového vzoru a snímání kamerou či více kamerami.

I když se dotykové nástroje a zařízení stále v hojné míře využívají, je patrný vzestup použití bezkontaktních inspekčních systémů. Důvodem je zejména jejich zvyšující se přesnost. U hlavního zástupce dotykových systémů, CMM, se udává přesnost v rozmezí (2,5 – 25) μm (dle [2]). U bezdotykových systémů je pak přesnost na této horní hranici nebo horší. Postupně se však přesnost těchto systémů zvyšuje. Dalším důvodem většího využití bezkontaktních systémů je podstatně větší rychlost, kterou měření probíhají. U CMM je dosahováno rychlostí do 60 bodů za minutu, u bezkontaktních systémů jsou to tisíce bodů získané během stejné doby. Výstupem jsou pak celé plochy na měřeném dílu, nejen diskrétní body jako u CMM. Dalšími výhodami u bezkontaktních systémů je jejich snadnější obsluha nebo možnost měřit i pružné materiály.

U všech tří zmíněných metod získání měřených dat probíhaly a probíhají snahy o automatizaci takových měření. Automatizace inspekce má za cíl zrychlit proces výroby a ověření nového dílu a tím celý proces zefektivnit a zlevnit. Zároveň se automatizací snižují časové nároky na obsluhu a tím dochází opět ke snižování nákladů. Inspekce však neznamená pouze získání měřených dat, ale také další kroky vedoucí k ověření zadaných specifikací. Výzkumu možností automatizace tedy podléhá jednak proces získání dat, ale zejména v posledních letech také procesy následující po získání dat, tedy registrace (sesouhlasení) navržených (CAD) a naměřených dat a vyhodnocení výsledků tohoto porovnání.

CAD data se pak nepoužívají jen při porovnávání této dvojice dat, ale jsou snahy o jejich využití při samotném inspekčním měření, pro jeho automatizaci tak, aby byly vygenerovány ideální dráhy nebo pozice pro proměření celého dílu nebo zadané části. Vývoj u jednotlivých metod (CMM, laserové skenery, světelné skenery) odpovídá jejich nasazení v praxi a době, po kterou se již používají. U CMM je plánování inspekce na základě CAD dat poměrně běžné a pro laserové skenery se v jisté míře také již využívají. Pro skenery využívající proužkové projekce však doposud existují jen některé studie řešící tuto problematiku.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Následující text uvádí přehled poznání z oblasti inspekce. Zaměřuje na optické metody využívané k získání dat pro inspekční měření především v oblasti strojírenství. V kapitole je shrnut současný stav poznání v oblasti přípravné fáze automatizace inspekčních systémů, tj. určení vhodných pozic měření. Jsou rozebrány a hodnoceny studie zabývající se touto fází automatizace u nejčastěji používaných prostorových digitalizačních metod uplatněných u CMM, laserových skenerů, skenerů s proužkovou projekcí a fotogrammetrických systémů. Dále tato kapitola uvádí přehled metod, které redukují negativní vlivy odlesků a různé odrazivosti skenovaných povrchů v případě využití skenerů s proužkovou projekcí. Popsány a hodnoceny jsou také studie, které využívají různé typy osvětlovacích modelů pro predikci odlesků vznikajících při měření lesklých dílů.

2.1 Inspekční měření

Jak již bylo uvedeno v úvodu, inspekci se rozumí proces, během kterého se posuzuje, zda se daný produkt (objekt) odchyluje od zadaných specifikací. Podrobnější rozdělení typů inspekce a z něho vyplývající zařazení konkrétního typu inspekce – kontrola rozměrů a geometrických tolerancí u plechových dílů v průběhu sériové výroby v automobilním průmyslu – je možné převzít od Newmana a Jaina [1]. Ti uvádějí tyto základní typy inspekce:

- *vstupní inspekce* – kontrola vstupního materiálu do procesu výroby
- *procesní inspekce* – kontrola na výstupu dílčí výrobní fáze; umožňuje úpravu nástrojů a zabráňuje výrobě dále nepoužitelných dílů
- *výstupní inspekce* – kontrola na výstupu finální výrobní nebo montážní fáze; zevrubná kontrola pro posouzení přijatelnosti daného výrobku.

Inspekce uvažovaná v dalším textu spadá k druhému typu, protože se jedná o kontrolu plechových dílů, které pokračují k dalšímu zpracování v rámci montáže a úpravě povrchu. V rámci procesní inspekce lze uvažovanou inspekci plechových dílů řadit do inspekce *podle proměnných*, konkrétně do *kvalitativní inspekce*. Jedná se o kontrolu kvalitativních proměnných daného dílu, jako jsou rozměry vybraných prvků měřeného dílu nebo předepsané geometrické tolerance.

Důležitým hlediskem u inspekce je její rozsah. Může se jednat o *stoprocentní inspekci* nebo *inspekci dávky*. V prvním případě se kontrolují všechny vyráběné díly, ve druhém každý x-tý díl. Žádoucí je první způsob, protože u druhého způsobu je riziko výběru nereprezentativního vzorku a obecně možnost výstupu nepřijatelného kusu, který nebyl v kontrolované dávce. U prvního způsobu je však hlavním omezením rychlost takové inspekce, především v sériové výrobě. Pokud se má jednat o automatizovanou inspekci, požadavky na ni jsou následující: běh v reálném čase, konzistence, spolehlivost, robustnost a cenová efektivita.

2.1.1 Inspekce založená na CAD modelu a její problémy

Speciálním druhem inspekce je inspekce založená na CAD modelu. Ten v sobě může obsahovat informace o tolerancích, které musí vyrobený díl splňovat. Během inspekce mohou být tyto tolerance kontrolovány. Může také sloužit pro plánování pozic a dalších parametrů senzoru takovým způsobem, aby byl splněn zadaný inspekční úkol.

Problémem u inspekce založené na CAD modelu zůstává nekonzistence ve způsobu zadávání tolerančních dat do samotného CAD modelu. Jednotlivé CAD modeláře mají často možnost zadávat informace o tolerancích do daného modelu, ale neumožňují tyto informace exportovat do univerzálních přenosových formátů IGES nebo STEP [3].

STEP je přenosový formát normy ISO 10303 vytvořený a udržovaný výborem normy ISO. Obsahuje řadu aplikačních protokolů, které definují zásady a strukturu prováděných aktivit pro různé oblasti průmyslu a aplikací. Protokoly se aktualizují a postupně přibývají další. Protokoly AP 203ed2, 210, 214, 224 a 238 obsahují zásady týkající se rozměrového a geometrického tolerování [4]. Formát STEP tedy umožňuje informace o rozměrových a geometrických tolerancích nést, CAD aplikace toho většinou nevyužívají a v případě importu CAD modelu do inspekčního softwaru musí být toleranční data předepsána znovu (často podle zbytečně vytvářeného výkresu) a tento krok práce se tedy zbytečně zdvojuje.

2.1.2 Fáze inspekčního měření

Inspekční měření sestává z jednotlivých fází, které jsou mnohdy spojené do jednoho celku a těžko od sebe oddělitelné, ale pro jejich vymezení budou uvedeny odděleně:

- *Příprava měření* – identifikace prvků, které mají být kontrolovány. Tento krok může probíhat už v CAD softwaru, ale často je to proces, který probíhá až ve specializovaném inspekčním softwaru. Souvisí s funkcí daného dílu.
- *Získání dat měření* – probíhá jednou z metod kontaktního nebo bezkontaktního měření [5]. Součástí tohoto kroku je i úprava získaných dat pomocí filtrování, redukce polygonů, apod.
- *Srovnání dat* – naměřená data je nutné ustavit do stejného souřadného systému jako modelová data. To může být řešeno pomocí referenčních bodů (například RPS body) nebo pomocí tzv. best-fitu, tedy zarovnáním měřených a modelových dat s co nejmenšími odchylkami (často řešeno pomocí metody ICP).
- *Kontrola rozměrů* – po zarovnání dat může proběhnout samotné porovnání předepsaných rozměrů, kontrolních bodů nebo geometrických tolerancí.

Inspekční systém, který řeší celý sled uvedených kroků je představen například od autorů Gao a kolektiv [6]. Opět je uvedeno, že nefunguje korektní převod dat z CAD systému do inspekčních softwarů nebo softwarů určených pro reverzní inženýrství. Proto autoři musí předepsat tyto tolerance ve svém systému k modelu měřeného dílu znovu. Následuje měření pomocí optického systému, zarovnání měřených a modelových dat pomocí best-fitu, automatická identifikace kontrolovaných prvků na měřených datech, porovnání předepsaných rozměrových a geometrických tolerancí se skutečnými naměřenými hodnotami a výstup v podobě barevných map odchylek nebo tabulek s vyhodnocenými hodnotami. Obdobný inspekční systém je komerční systém GOM Inspect Professional od německé firmy GOM GmbH [7].

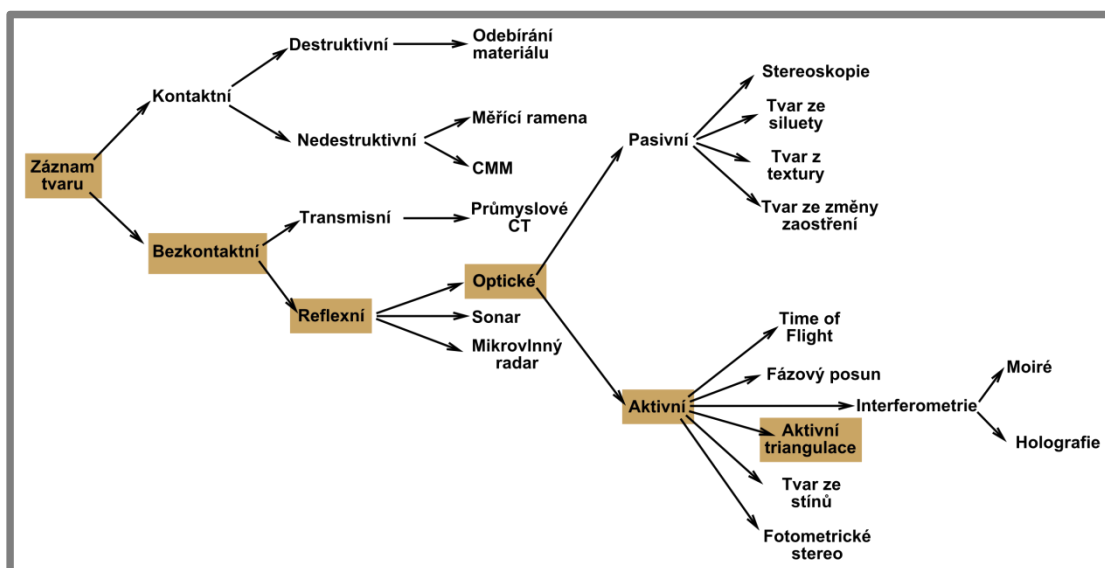
V další části se text práce zaměřuje především na fázi *získání dat měření*. Do této fáze inspekčního měření lze v případě automatizovaného měření řadit i přípravu pozic měření.

2.2 Prostorové digitalizační metody

2.2.1 Dělení digitalizačních metod

Způsobů dělení digitalizačních metod, pomocí kterých je možné získat data pro inspekční měření, existuje celá řada. Jedním ze způsobů, který je uveden v [8], je dělení na základě velikosti měřeného objektu a zároveň požadované přesnosti. V tomto případě je uvedeno pouze dělení bezkontaktních metod měření. Jiným způsobem dělení, které tato kniha uvádí, je dělení na základě vlnové délky použité u daného senzoru. Jsou to metody využívající mikrovln, světelných nebo ultrazvukových vln.

Kniha [9] uvádí rozšířenější způsob dělení a to na metody kontaktní a bezkontaktní. Tyto metody pak rozčleňuje dále, jak je uvedeno na Obr. 2-1. Z vypsanych metod se v průmyslové praxi nejčastěji využívají z kontaktních CMM (Coordinate Measuring Machine = Zařízení pro měření souřadnic) a z bezkontaktních zařízení využívající metod aktivní triangulace. Na aktivní triangulaci je založena i metoda strukturovaného světla, kterou využívají laserové skenery a skenery s proužkovou projekcí. Vedle nich je v průmyslové praxi ještě široce využívána pasivní triangulační metoda fotogrammetrie, v Obr. 2-1 uvedená jako stereoskopie. Tato práce se zaměřuje na metodu proužkové projekce, protože se jedná o metodu získávající v porovnání s ostatními metodami největší množství dat za stejný časový úsek.

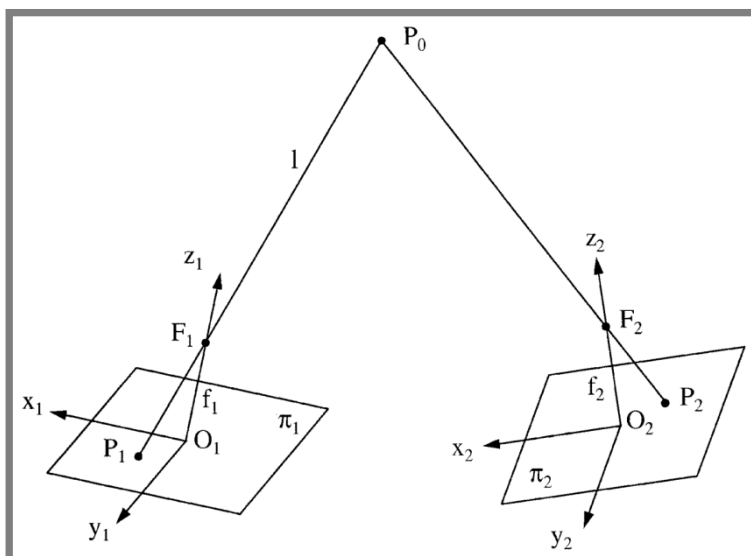


Obr. 2-1 Metody získání informace o tvaru objektu [9]

2.2.2 Popis metody proužkové projekce

Základem metody proužkové projekce je, stejně jako u laserového skeneru, triangulace a využití epipolární geometrie. Obr. 2-2 zobrazuje obrazové roviny dvou kamer (π_1 a π_2), jejichž pozice jsou známy. Body P_1 a P_2 jsou zobrazením obecného bodu v prostoru P_0 . F_1 a F_2 jsou body na osách z_1 a z_2 v ohniskové vzdálenosti kamery f_1 a f_2 . Uvažujme, že P_1 je projekce bodu P_0 podél přímky l do obrazové roviny π_1 . P_0 může být bod libovolně daleko na přímce l a pozice P_2 v π_2 není zřejmá. Je ale možné říct, že bod P_2 leží na průsečnici roviny π_2 a roviny tvořené body F_1 , F_2 a P_1 [10]. Přesnou pozici na této průsečnici je už nutné v případě proužkové projekce určit pomocí některého z druhů kódování. Obdobný princip totiž

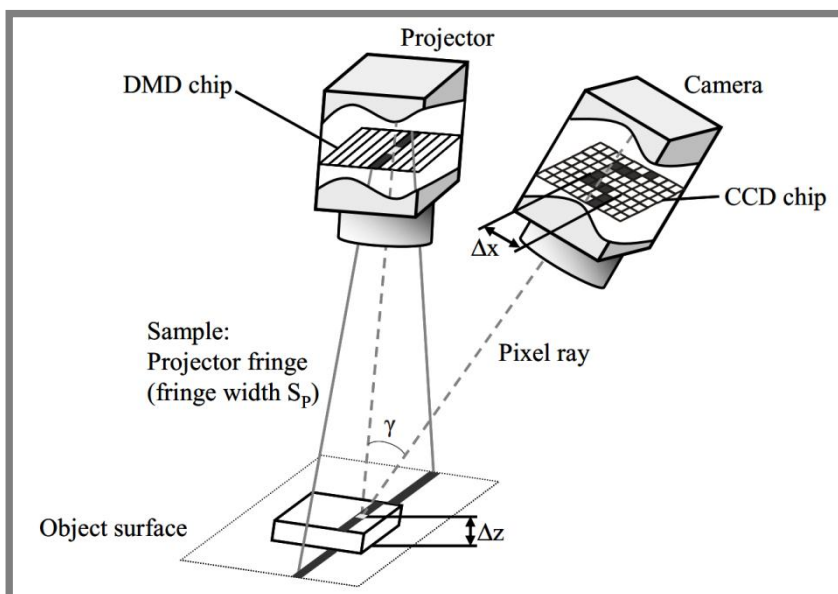
funguje v případě, kdy je jedna kamera nahrazena projektorem, promítajícím známý vzor.



Obr. 2-2 Obecný vztah dvou optických senzorů [10]

Proces získání prostorových dat metodou proužkové projekce, v případě využití vzorů s fázovým posuvem, sestává z následujících kroků [11]:

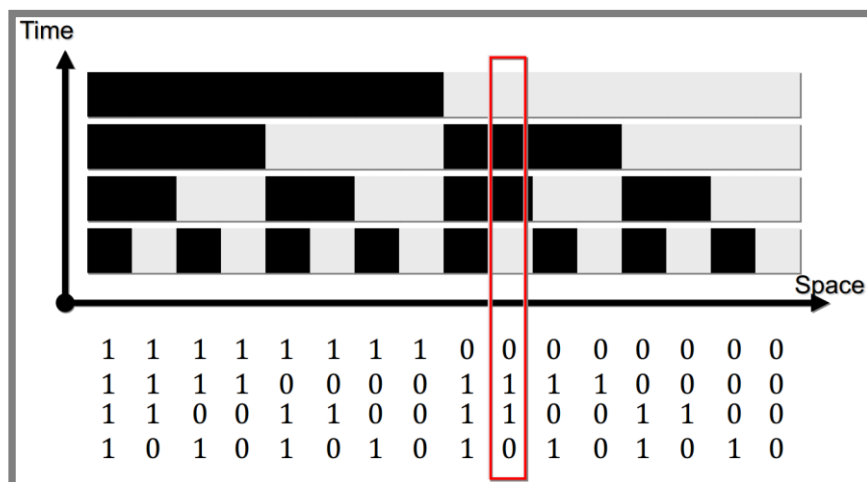
1. Projekce strukturovaného světelného vzoru (viz Obr. 2-3)
2. Záznam fázově modulovaného promítaného vzoru kamerou
3. Výpočet fázové modulační analýzy obrazu
4. Rozbalení fáze pro získání souvislého fázového rozložení, které proporcčně odpovídá změně výšky objektu
5. Kalibrace systému pro převedení do skutečných 3D souřadnic



Obr. 2-3 Princip funkce proužkové projekce [66]

Pro bližší přehled studií zabývajících se jednotlivými fázemi z výše uvedeného seznamu doporučuji přehledový článek [11]. Pro přehled používaných strukturovaných vzorů a jejich dělení doporučuji články [10] a [12].

V případě nejjednoduššího typu kódování – binárního kódu – je principem promítání n vzorů (snímků), pokud má být dekodováno 2^n pruhů. Na Obr. 2-4 reprezentuje každý řádek jeden snímek, znamená to tedy, že by byly promítnuty čtyři snímky a dekodováno 16 pruhů. Každý pruh nese svůj unikátní binární kód (např. 0110) a pruhy na snímcích kamery tedy mohou být zpětně dekodovány [13].



Obr. 2-4 Princip kódování pomocí binárního kódu [13]

2.3 Porovnání měřicích metod pro získání inspekčních dat

2.3.1 Srovnání přesnosti a rychlosti měřicích metod

Důležitými parametry pro srovnání jednotlivých inspekčních metod jsou jejich přesnost a rychlost získání dat měření. Tyto parametry uvádí pro vybrané metody Tabulka 1.

Tabulka 1 Parametry přesnosti a rychlosti získání dat měření u vybraných inspekčních metod

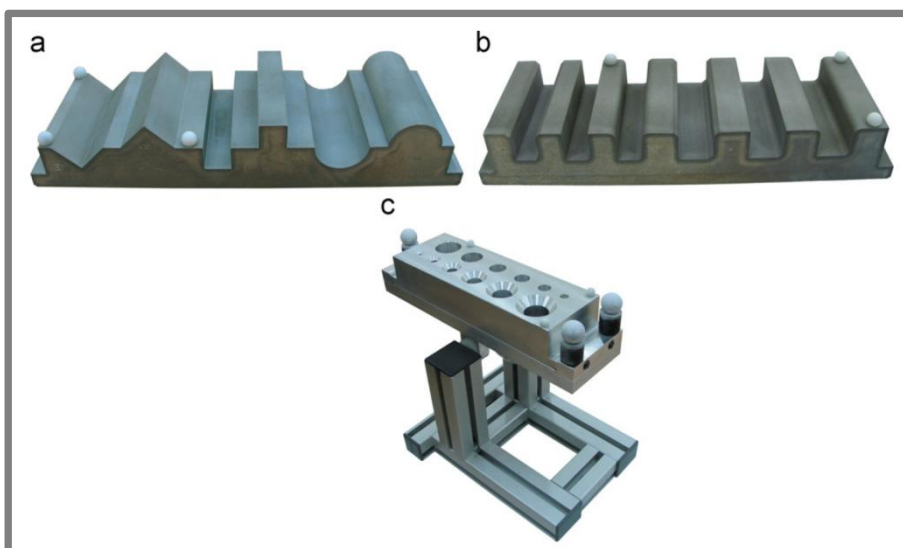
Metoda	Přesnost	Rychlost (bodů)
CMM	~ 2,5–25 μm	~ 60/min
Laserový skener	~ 10–200 μm	~ $1 \times 10^{4-5}/\text{s}$
Skener se strukturovaným světlem	~ 10–200 μm	~ $1 \times 10^{5-6}/\text{s}$
Fotogrammetrie	~ 50 μm (vzd. 2 m) [14]	~ 10–100/min

V tabulce uvedené hodnoty jsou často měřeny za ideálních podmínek a nevypovídají ještě zcela o skutečné přesnosti dosažené při inspekčním měření. Proto jsou dále uvedeny některé studie, které porovnávají výše uvedená zařízení v reálných měřeních.

2.3.2 Porovnání měření pomocí CMM a laserového skeneru

Článek [15] porovnává přesnost inspekce rozměrových a geometrických tolerancí prováděnou pomocí kontaktního CMM a laserového skeneru. Maximální dovolená

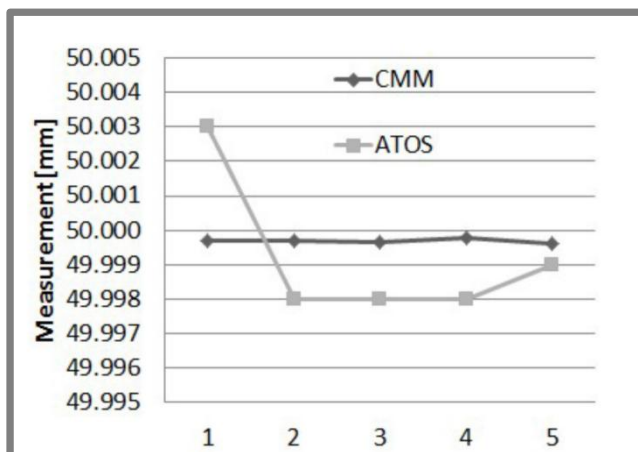
chyba udávaná u CMM podle normy ISO 10360-2 je definována jako: $MPEE(\mu m) = 2,2 + 3L/1000$, kde L (mm) je největší měřený rozměr dílu. Při rozměru dílu 1 m je to tedy odchylka $5,2 \mu m$. U použitého laserového skeneru je výrobcem udávaná opakovatelnost měření $25 \mu m$. Přesnost daných systémů je porovnávána na třech vyrobených dílech (viz Obr. 2-5) s tím, že data z CMM měření jsou brána jako referenční a podle nich jsou určovány odchylky z měření pomocí laserového skeneru. Na dílech jsou měřeny standardní geometrické tvary (roviny, koule, válce, kužely). Z navazujícího článku [16] vyplývá, že při použití laserového skeneru a aplikaci globální strategie skenování, je možné dosáhnout přesnosti skenování okolo $(15 - 20) \mu m$. Globální strategie skenování vyžaduje kolmý směr skeneru vůči skenovanému povrchu. V opačném případě se přesnost skenování výrazně snížila. Autoři v práci mimo jiné také porovnávají vliv zpracování a ustavení dat v různých softwarech (CATIA, GEOMAGIC) se závěrem, že v tomto ohledu je výhodnější software CATIA.



Obr. 2-5 Díly pro porovnání přesnosti CMM a laserového skeneru [16]

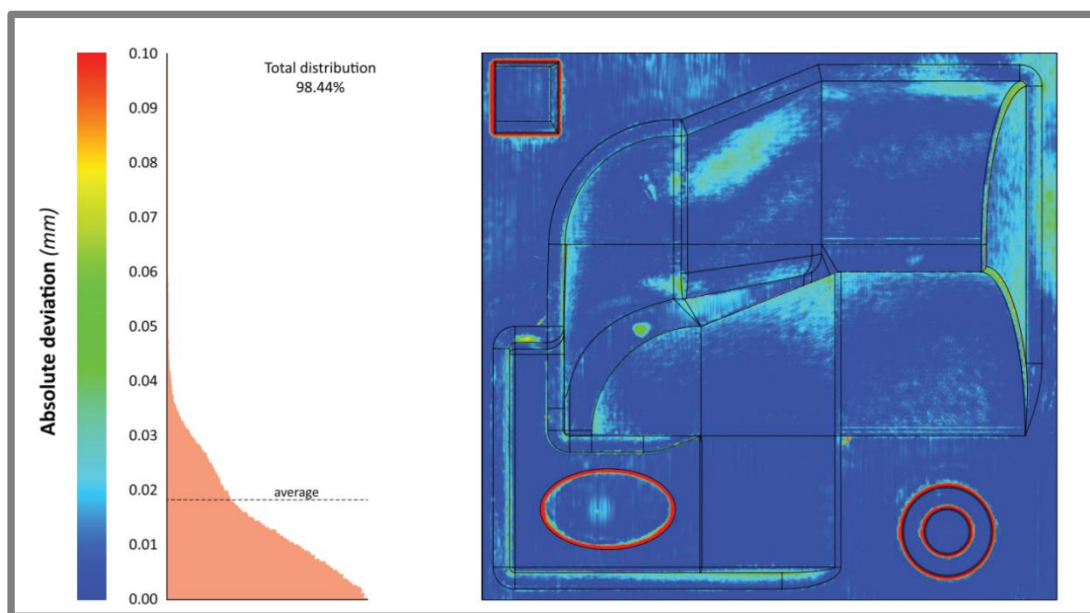
2.3.3 Porovnání měření pomocí CMM a skeneru s proužkovou projekcí

V práci od Brajliha a kolektivu [17] je prováděno měření koncových měrek pomocí skeneru s proužkovou projekcí (ATOS II) pro určení nejistoty jeho měření. U koncové měrky s rozměrem 70 mm byla směrodatná odchylka deseti měření $11,2 \mu m$ a rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95 % byla $25 \mu m$. Další měření bylo provedeno s ocelovou koulí a v tomto případě proběhlo měření pomocí CMM i skeneru ATOS. Výsledek pěti měření je na Obr. 2-6. Rozpětí naměřených dat pomocí ATOSu je $5 \mu m$ a nejistota měření má stejnou hodnotu. Tyto výsledky jsou však také kladně ovlivněny použitím zmatňujícího prášku, který snížil oproti měření koncové měrky šum měření.



Obr. 2-6 Srovnání měření průměru ocelové koule pomocí CMM a ATOS II [17]

Porovnání přesnosti měření pomocí CMM a skeneru s proužkovou projekcí provádí také studie [18]. V ní autoři navrhují metodu pro srovnání schopností skenování různých bezkontaktních skenerů. Autoři navrhli vlastní inovativní díl, který obsahuje běžné geometrické prvky i volné plochy a zohledňuje tak měření reálných dílů. Porovnání prováděli s CMM Renishaw Cyclone, které sloužilo za referenční měření a s 3D skenerem ATOS III. Průměrná chyba na měřeném dílu byla 20 μm a směrodatná odchylka 70 μm (viz Obr. 2-7). To je ve shodě s přesností udávanou výrobcem pro ATOS III.



Obr. 2-7 Srovnání dat měření pomocí CMM a ATOS III [18]

Konkrétní 3D skenery a jejich přesnost srovnává článek [19]. Data z jednotlivých skenerů jsou porovnávána s referenčními hodnotami tří kalibračních objektů: koule, válcový díl a koncová měrka. Srovnání probíhá u těchto skenerů: skener s proužkovou projekcí (ATOS I), laserový skener spojený se sledovací stanicí (K-Scan), ruční laserový skener (HandyScan Exascan), laserový skener na CMM a počítačová tomografie (CT). Z výsledků vyplývá, že nejpřesnější hodnoty jsou

získány z měření pomocí systému ATOS, následuje laserový skener na CMM, počítačová tomografie, laserový skener se sledovací stanicí K-Scan a ruční skener HandyScan. Jediné měření ze skeneru HandyScan obsahuje body s nepřesností větší než 200 μm . U skeneru ATOS je maximální chyba do 50 μm .

2.3.4 Norma pro stanovení přesnosti optických skenerů

Některé výše uvedené studie byly provedeny také z toho důvodu, že do současné doby neexistuje světově uznávaná norma, která by stanovila postupy pro stanovení přesnosti optických skenerů. Tento nedostatek zmiňuje například studie [17], v níž autoři dodávají, že výrobci si pak pro své skenery musí stanovit tyto procedury sami. Chybějící normu uvádí i studie [15] a [18]. Druhá zmíněná uvádí jedinou dosud uvedenou normu, která se tímto problémem zabývá a to německou směrnici VDI/VDE 2634. Obecně však protokoly VDI nejsou závazné. Směrnice VDI/VDE 2634 vyžaduje měření na velmi přesných jednoduchých kalibračních elementech, které nesimulují reálné podmínky. Navíc tato směrnice vyžaduje porovnání výsledků z jediného záběru skeneru. Až třetí část této směrnice uvažuje porovnání výsledků měření z více záběrů.

Směrnice VDI/VDE 2634 má v současné době tyto tři části:

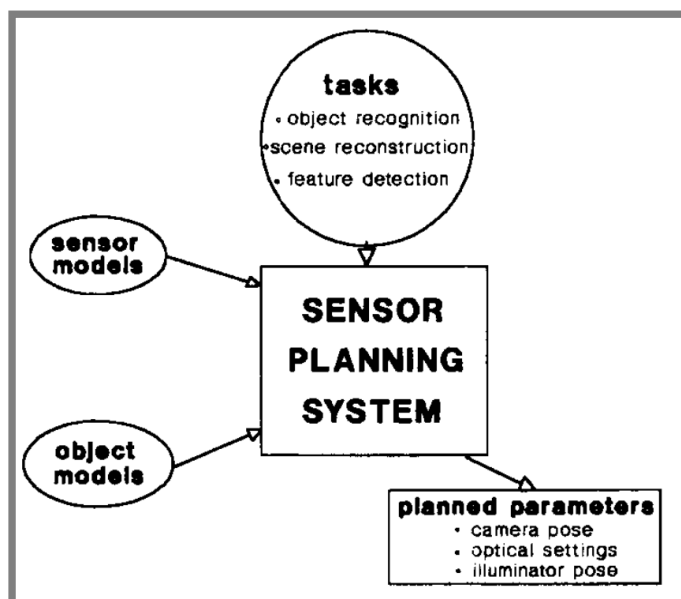
1. VDI/VDE 2634 část 1:2002-05 – zobrazovací systémy s měřením diskrétních bodů
2. VDI/VDE 2634 část 2:2012-08 – optické systémy založené na plošném měření
3. VDI/VDE 2634 část 3:2008-12 – systémy založené na plošném měření s více snímky

V nedávné době (2013) se využitím této normy (části 2) k testování parametrů konkrétních skenovacích systémů zabýval ve své diplomové práci Ing. Jakub Kozák z ČVUT v Praze [20].

2.4 Plánování snímání

2.4

Problém plánování snímání (sensor planning) může být definovaný jako problém nalezení, popsání a modelování vztahu mezi objektem, který má být pozorován a senzoru, který ho pozoruje. Tento problém pak má být popsán pomocí jasných úkolů a výstupem jsou parametry senzoru a osvětlení (viz Obr. 2-8). Důležitost volby místa pozorování je zjevná, protože z jeho kvality vychází z velké části kvalita získaných dat měření.



Obr. 2-8 Plánování pozic v oblasti počítačového vidění [21]

Obecně uznávaným a přijímaným (a často citovaným) článkem zabývajícím se problematikou plánování snímání je přehledový článek od Tarabanise [21]. Problematiku plánování snímání je možné rozdělit do tří kategorií:

- detekce prvků objektu
- na modelu založené rozpoznání a lokalizace objektů
- rekonstrukce scény.

Pro problémy prvního druhu (problémy detekce prvků objektu) uvažujeme, že je předem znám model měřeného objektu i jeho skutečná pozice v prostoru a jsou známy i parametry senzoru. Pak jsou známy a používány čtyři přístupy k řešení takového problému [21], [22]:

- *generuj a testuj* – jsou vygenerovány konfigurace senzoru, které jsou následně testovány ve vztahu k zadaným úkolům
- *syntéza* – požadavky zadaných úkolů jsou charakterizovány analyticky a parametry senzoru, které naplňují zadané požadavky, jsou určeny přímo
- *systemy simulace senzoru* – vizualizace scény na základě parametrů senzoru a výběr finální sady pohledů na základě splnění požadavků úkolů
- *expertní systémy* – tyto systémy pracují se znalostní bází, ze které odvozují doporučení pro vhodnou konfiguraci senzoru.

Vstupy systému pro plánování snímání jsou zobrazeny již na Obr. 2-8 a jsou to [21]:

- *parametry senzoru* – obecně se dělí na geometrické a optické a udávají se u kamery a zdroje světla
 - *geometrické parametry kamery* – pozice senzoru v prostoru (x, y, z); orientace senzoru definovaná například pomocí optické osy
 - *optické parametry kamery* – vzdálenost mezi hlavním bodem H' a obrazovou rovinou; průměr clony; ohnisková vzdálenost; expoziční čas; atd.

- *geometrické parametry zdroje světla* – pozice zdroje světla v prostoru (x, y, z); orientace zdroje světla v prostoru definovaná například pomocí optické osy; geometrická charakteristika světelného svazku
- *radiologické parametry zdroje světla* – zářivost; prostorové rozložení zářivosti; spektrální rozložení zářivosti; polarizace osvětlení
- *model senzoru a objektu* – model snímáče, objektivu, zdroje světla
 - *konstanty a parametry senzoru a zdroje světla* – úhel zorného pole; počet a velikost pixelů; šum snímáče; atd.
 - *vztahy mezi parametry a konstantami senzoru* – model perspektivního zobrazení; atd.
 - *model objektu* – CAD model obsahující topologické a geometrické informace; fotometrické údaje jako barva a odrazivost povrchu měřeného objektu
- *omezující parametry zjistitelnosti prvků*
 - *omezující parametry senzoru* – viditelnost; zorné pole; zaostření; zvětšení; perspektivní zkreslení; atd.
 - *radiometrická omezení* – osvětlitelnost; dynamický rozsah; kontrast; atd.

Obecné požadavky na systém plánování snímání, které se v mnohém shodují se vstupními parametry uvedenými výše, ve své studii [23] uvádí Scott a kolektiv:

Tabulka 2 Požadavky na systém plánování snímání [23]

Kategorie	Požadavek
Obecné	Specifikace kvality modelu
	Zobecněný algoritmus
	Zobecněné pohledy
	Překryv pohledů
	Robustnost
	Efektivnost
	Samo-ukončující
Objekt	Minimum dopředu známého
	Tvar
	Materiál
Senzor	Frustum (komolý jehlan)
	Efekty stínu
	Systém hodnocení kvality měření
Polohovací systém	6D poloha
	Omezující vazby polohy
	Systém hodnocení kvality polohování

2.4.1 Segmentace povrchu dílu a prostoru možných pohledů

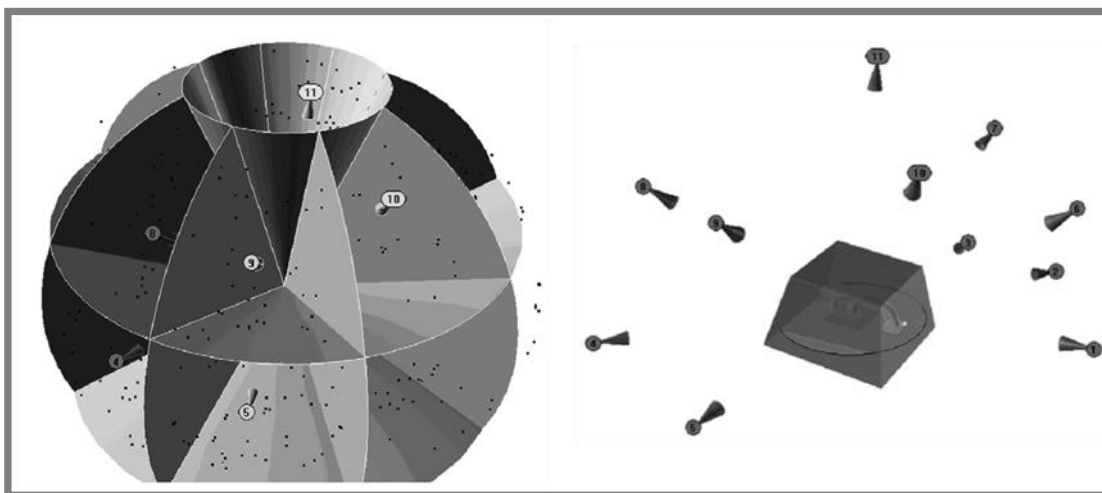
Segmentace dat modelu měřeného dílu je v problematice plánování snímání důležitá z toho důvodu, že řeší rozdělení modelu na menší oblasti, pro které je následně

možné hledat jednotlivé pozice měření tak, že data daného segmentu budou s velkou pravděpodobností z takové pozice zaznamenána.

V oblasti měření plechových dílů zejména z automobilního průmyslu, které se vyznačují svým plošným charakterem, se pro segmentaci dílu využívá metoda plochých plátů. Tuto metodu uvádí například článek [24]. Díly, pro něž se tento druh segmentace využívá, se vyznačují tím, že se skládají z několika rovných plátů spojených hranami nebo rádiusovými přechody. Jednotlivé pláty a potažmo i segmenty pak mají následující charakter: *plát neobsahuje žádné tvarově složité prvky, křivost plátu se nikde prudce nemění, plát se rozprostírá do šířky a délky více než do výšky*. Jinak lze tyto podmínky vyjádřit i tak, že normála v jakémkoliv místě daného plátu se od průměrné normály plátu neliší více než o určitou prahovou hodnotu.

Segmentaci plochých dílů řeší také článek [25]. Autoři zde využívají metodu interpolačních NURBS ploch. Plochý díl je promítnut na tuto interpolační NURBS plochu a ta je následně rozdělena na oblasti podle velikosti zorného pole použitého skeneru, jak je znázorněno na Obr. 2-16. Tato metoda je výhodná pro velké plošné díly bez lokálních změn křivosti. Místa s vysokou lokální změnou křivosti by musela být na objektu identifikována a doplněna dalšími měřicími pozicemi.

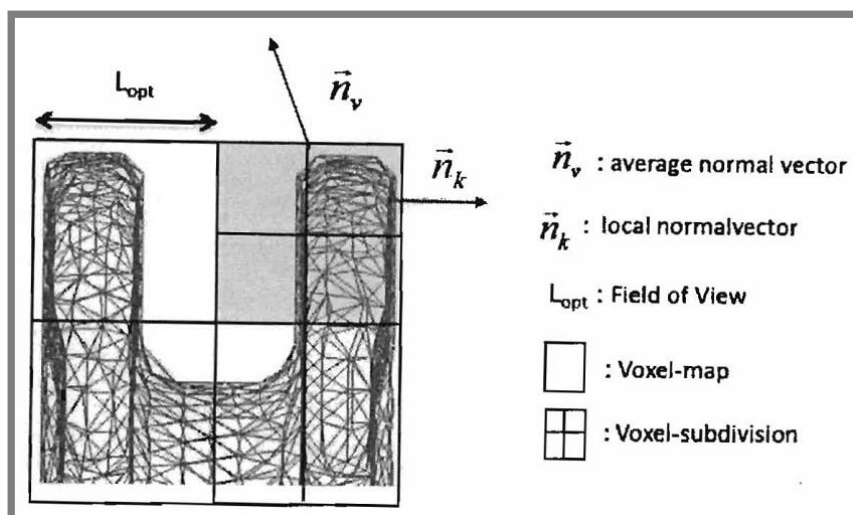
Pro díly, které nemají plošný charakter, uvádějí autoři v článku [26] způsob segmentace pomocí dělení kulového prostoru. Tímto způsobem je kulový prostor kolem měřeného dílu rozdělen do výsečí, v nichž jsou vygenerovány možné pozice skenování, a z nich je poté vybrána optimální pozice pro každou výseč. Nedostatkem této metody může být nedostatečné pokrytí směrů, v nichž má díl větší složitost.



Obr. 2-9 Segmentace pomocí dělení kulového prostoru [26]

Jiný druh segmentace, dělení dílu pomocí voxelů¹, navrhuji autoři v článku [27], kde autoři používají princip dělení měřeného dílu na voxely podle změn křivosti v daném voxelu, tj. podle rozsahu normál zkoumaných polygonů (viz Obr. 2-10). Jejich metoda má jistá omezení v možném vzniku velmi malých voxelů, čemuž by mělo být zabráněno kombinací více voxelů dohromady. Větší nevýhodou je však absence simulace a tedy ověření skutečné viditelnosti před měřením.

¹ Voxel je částice objemu představující hodnotu v pravidelné mřížce 3D prostoru [80]



Obr. 2-10 Segmentace pomocí dělení na voxely [27]

2.4.2 Mapy viditelnosti

K zúžení návrhu možných pozic skenování jednotlivých segmentů se ve více pracích využívá metoda nazývaná jako mapy viditelnosti (Visibility Maps = VM). Tato metoda umožňuje určit pro jeden nebo více prvků možné směry, odkud jsou tyto prvky viditelné, tzn., nejsou zastíněné jinou částí objektu. Metoda je poprvé blíže popsána v práci [28], i když se vyskytuje v o něco dřívějším článku [29] stejných autorů.

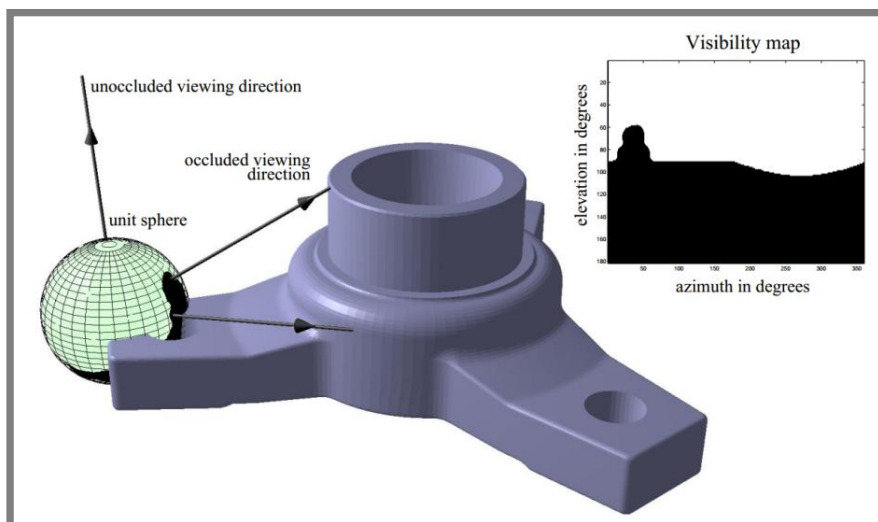
Princip metody spočívá ve vytvoření jednotkové koule v bodě, pro nějž chceme vypočítat viditelnost. Na tuto jednotkovou kouli se následně promítnou trojúhelníky sítě, pomocí níž je celý objekt reprezentovaný. Výsledkem je ve sférických souřadnicích mapovaná binární informace o viditelnosti. Tato informace může být převedena do rozvinutých válcových souřadnic, jak je patrné na Obr. 2-11. Autoři uvádějí u této metody výpočetní složitost $O(n)$.

Metoda je dále rozšířená pro výpočet společné mapy, tzv. kombinované mapy viditelnosti (Combined Visibility Map = CVM). Ta vznikne jednoduchým součtem jednotlivých VM z více bodů objektu. Výsledek může být zobrazen v odstínech šedi s bílou barvou pro plnou viditelnost a černou barvou pro nulovou viditelnost. Ukázka takové CVM pro tři body je na Obr. 2-12.

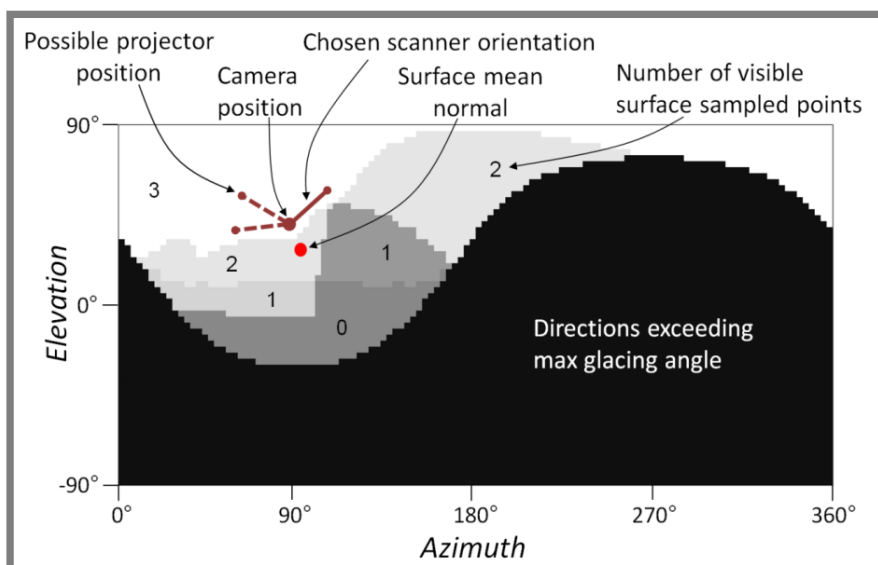
Nevýhodou této metody je fakt, že při výpočtu mapy viditelnosti pro dva body, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu d , a ze vzdálenosti h je na jejich jednotkové koule promítnut stejný bod p , je tento bod promítnut v jiném úhlu a to s rozdílem $\Delta\alpha$. V práci [28] je uveden podrobný výpočet této chyby. V praxi tento nedostatek znamená, že poměr vzdálenosti pozorovatele vůči maximální vzdálenosti bodů, pro něž je CVM počítána, musí být co největší. Pro plnou viditelnost s použitým vzorkovacím intervalem $v = 1$ by měl být tento poměr menší než 0,004. Dalším možným opatřením, pokud není možné zvětšit vzdálenost pozorovatele, je volit ve výsledné CVM takové pozorovací pozice, které jsou co nejdál od míst, kde dochází k zastínění.

Práce [28] a [30] uvádějí různé aplikace této metody nejen pro určení pozic skenování, ale například pro *rozpoznání objektů*, *výběr pozorovacích pozic na základě entropie* nebo *optimální asociaci prvek-senzor*. V kapitole týkající se využití osvětlovacích modelů v inspekčních systémech (2.8.3) je zmíněna práce [31], která

popisuje využití VM pro hledání místa, které splňuje zadané podmínky osvětlení (difuzního a reflexního) určitého prvku.



Obr. 2-11 Mapa viditelnosti pro bod tělesa ve středu jednotkové koule [30]



Obr. 2-12 Kombinovaná mapa viditelnosti v použití skeneru s proužkovou projekcí [25]

2.5 Automatizace v přípravě měřicích pozic

Práce se zaměřuje na automatizaci výpočtu pozic měření pomocí optických skenerů a konkrétně pak skenerů s proužkovou projekcí. V této kapitole jsou uvedeny příklady automatizace výpočtu pozic měření u těchto skenerů a zároveň také u CMM. Měření pomocí CMM zůstává v řadě případů preferovanou metodou pro získání dat k inspekci. Je to zejména z důvodu vyšší přesnosti a možnosti spolehlivě zaznamenat data u lesklých kovových objektů.

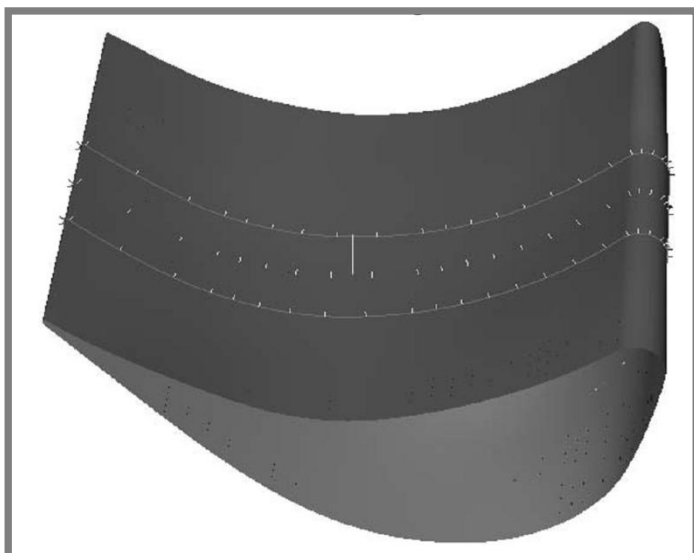
2.5.1 Automatizace přípravy pozic měření u CMM

Práce zabývající se automatizací v získávání dat měřeného dílu pomocí CMM se zaměřují zejména na způsoby vzorkování CAD dat měřeného dílu takovým způsobem, aby byla popisnost naměřených dat dostatečná pro požadovaný inspekční úkol. Na rozdíl od optických metod měření, kde je zaznamenáno velké množství bodů (v řádu statisíc až milionů), u CMM musí být každý bod měření stanoven operátorem nebo automatizačním algoritmem.

Ainsworth a kolektiv v článku [32] řeší jednak problematiku vzorkování povrchu měřeného dílu, ale také registraci CAD dat se souřadným systémem CMM. Registrace je řešena pomocí odsazených NURBS ploch, které jsou odsazeny do vzdálenosti poloměru měřicí sondy. Následně je vybráno šest iniciačních bodů na měřeném dílu a na CAD modelu, přes které se tyto dva celky k sobě přiblíží. K přesnému sesazení dojde pomocí ICP algoritmu. Koncept odsazených NURBS ploch je detailněji popsán v následující studii autorů [33]. Pro samotné vzorkování ploch měřeného dílu jsou navržena následující kritéria:

- *rovnoměrné vzorkování* – promítnutí rovnoměrné obdélníkové sítě na povrch měřeného tělesa. Na samotném tělese už vzorkování rovnoměrné být nemusí.
- *vzorkování dle křivosti* – vytvoření většího množství bodů v místech s větší křivostí (viz Obr. 2-13)
- *kritérium nejmenší vzorkovací hustoty* – definuje nejmenší vzdálenost mezi dvěma body, která může být použita
- *parametricky založené kritérium vzorkování* – na vybrané křivce musí být minimální počet bodů specifikovaný uživatelem.

Podle autorů byl daný systém použit na měření různých dílů, například lopatek turbín leteckých motorů. Nejsou však uvedena žádná data porovnávající přesnost a popisnost naměřených dat jednotlivými metodami nebo porovnání s uniformním vzorkováním. Vyšší stupeň vzorkování v místech s vyšší křivostí lze však pokládat za přínosné.



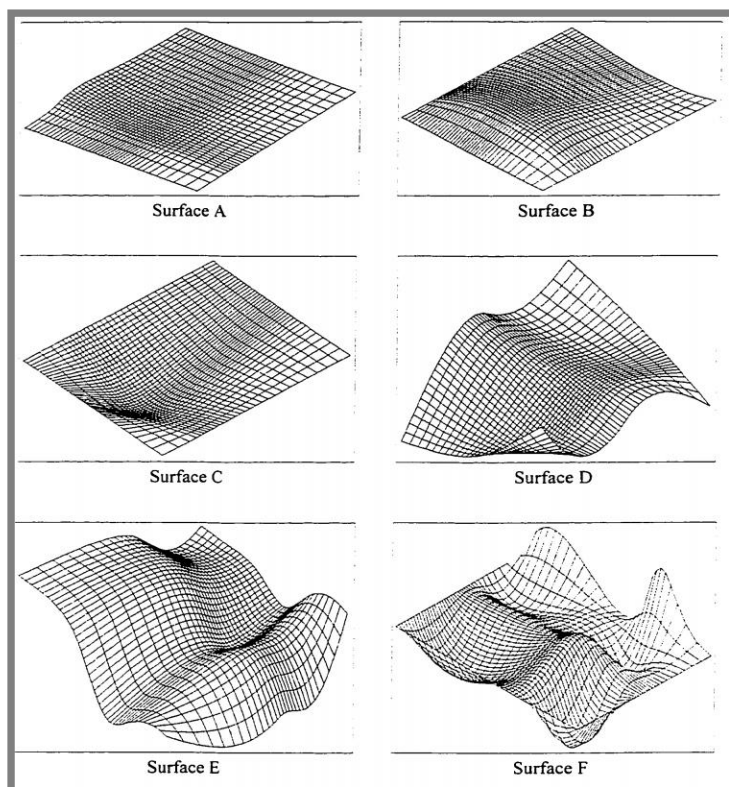
Obr. 2-13 Generování měřících bodů na základě lokální křivosti [32]

Problémem vzorkování povrchu měřeného dílu pro měření pomocí CMM se zabýval také tým okolo Elkotta [34]. V tomto případě jsou představeny čtyři heuristické algoritmy:

- *ekvi-parametrický* – vhodný pro plochy s malými změnami křivosti
- *založený na velikosti oblasti* – vytvoří rovnoměrné rozložení bodů v závislosti na velikosti oblasti. Špatně reaguje na ostré změny křivosti.
- *založený na změnách křivosti* – vytvoří rozložení bodů závislé na průměrné křivosti dané oblasti. Špatně reaguje na různé velikosti oblasti.
- *spojení předchozích dvou algoritmů* – postihuje oba výše popsání problémy
- *genetický algoritmus*.

Zároveň byl vytvořen algoritmus, který na základě křivosti a velikosti plochy rozhoduje, který z představených algoritmů bude použit.

Porovnání navržených vzorkovacích algoritmů bylo provedeno na plochách s různou složitostí (viz Obr. 2-14). Výsledky jsou nejlepší pro genetický algoritmus, problémem u něj je ale rychlost výpočtu. U ostatních algoritmů je čas výpočtu přibližně 60 s, u genetického algoritmu asi 6 000 s. Zvláště u složitých povrchů však genetický algoritmus prokázal užitečnost, protože pomocí ostatní algoritmů bylo velmi složité nalézt vhodné řešení.



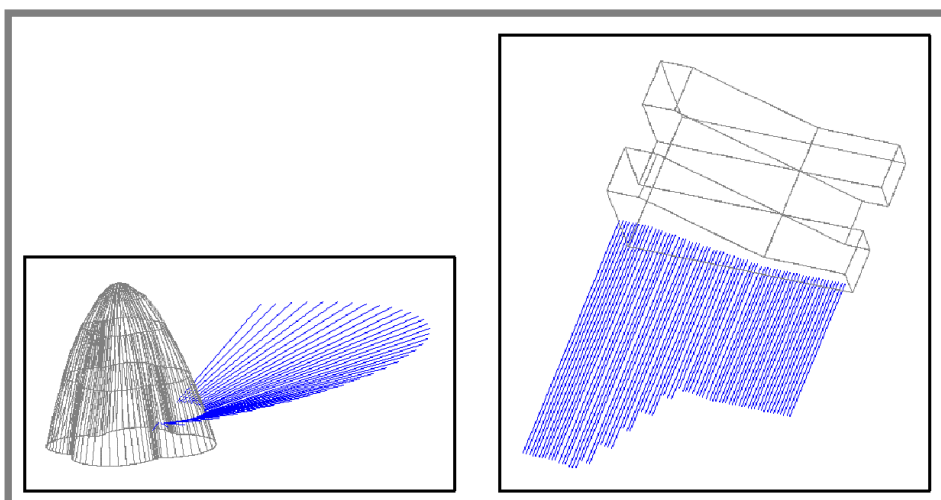
Obr. 2-14 Plochy použité pro testování vzorkovacích algoritmů [34]

2.5.2 Automatizace přípravy pozic měření u laserových skenerů

Laserové skenery, které fungují na principu triangulace, jsou ve své podstatě velmi podobné skenerům s proužkovou projekcí, jejichž princip byl popsán v kapitole 2.2.2. Rozdíl je v tom, že je promítán jeden laserový svazek, který tvoří na měřeném objektu jednu linii. Z jedné pozice je tedy možné získat informace jen o jednom řádku. U skeneru s proužkovou projekcí se na druhé straně promítá celá sada

proužků a výstupem je informace z celé promítané plochy. Laserový skener tak musí průběžně měnit svou polohu vůči měřenému dílu, aby se naskenovala souvislá plocha. V případě skenování laserovým skenerem se tedy nejedná o diskrétní pozice, ale o souvislé dráhy podél měřeného dílu. Automatickým návrhem těchto drah a určením parametrů, které ovlivňují jejich návrh, se zabývají dále uvedené práce.

V sérii prací od Prieta a kolektivu [35], [36] a [37], autoři představují a postupně rozšiřují práci zabývající se nalezením optimálních pozic měření, aby byla zajištěna co nejnížší odchylka naměřených dat. Experimentálním měřením bylo zjištěno, že laserový skener poskytuje výsledky s nejnížší odchylkou při splnění požadavku na vzdálenost od měřeného dílu d 170 až 240 mm a úhlech sklonu skenovací hlavy α (-35 až 35)° a β (-15 až 15)°. Ke generování pozic je využit CAD model reprezentovaný NURBS plochami, ke kontrole kolizí voxelový model dílu. Pozice jsou v první řadě generovány v kolmém pohledu k dané ploše (viz Obr. 2-15). Pokud je zjištěna okluze nebo kolize, jsou vygenerovány nové pozice, které již nemusí být kolmé, ale nacházejí se v ideálním rozsahu úhlů a vzdálenosti. Při nalezení všech potřebných pozic je vypočítána odhadovaná přesnost skenovaných dat, která je funkcí vzdálenosti d a úhlů α a β . Při dostatečné přesnosti je možné provést měření. Z výsledků studie vyplývá, že navržená metoda přináší zvýšení přesnosti naměřených dat, v konkrétním případě testovacího měření $25\text{ }\mu\text{m}$, což je pro inspekční úlohu značné zlepšení. Autoři neuvádějí, jakým způsobem je těleso rozděleno na menší plochy, na kterých se hledají optimální pozice. Ty se totiž určují pro každou plochu zvlášť. Také není uvedeno, jak se postupuje v případě, kdy nelze nalézt pozice, které by splňovaly uvedený rozsah vzdálenosti a úhlů.



Obr. 2-15 Vygenerované pohledy laserového skeneru pro jednotlivé plochy objektu [35]

V dalším kroku autoři přidávají k navržené metodě i kontrolu tolerancí měřeného dílu. Kromě výsledku inspekce v podobě naměřených tolerancí, jsou doplněny i hodnoty spolehlivosti daného výsledku určené na základě orientace skeneru vůči měřeným plochám. Výsledná metoda měření je porovnána na měření geometrických tolerancí s CMM. Z tohoto měření vyplývá, že u CMM dosahují odchylky $40\text{ }\mu\text{m}$, u laserového skeneru $180\text{ }\mu\text{m}$. To je hodnota, která je v současné době poměrně vysoká a je tak vidět pokrok ve zvyšování přesnosti optických skenerů, ke kterému došlo za posledních cca 14 let od provedení této studie. [19]

Autoři kolem Martinse uvedli metodu s odlišným přístupem k hledání pozic měření laserovým skenerem [38]. CAD model měřeného dílu převedli na voxelový model a zároveň využili polygonální model. Voxely jsou rozděleny na *vnitřní* a *povrchové*. Povrchové voxely jsou asociovány s trojúhelníky polygonální sítě. Hledá se takové řešení, aby byly navrženými pozicemi pokryty všechny povrchové voxely. Voxelový model zároveň sloužil ke kontrole kolizí při přejezdech skeneru.

Mahmud a kolektiv [39] se ve své práci snaží při hledání optimální cesty laserového skeneru zahrnout nejen vlastnosti a omezující parametry skeneru, ale také rozměrové a geometrické specifikace kontrolovaného dílu. Pro každý kontrolovaný prvek dílu je vypočítána přípustná nejistota měření spojená s předepsanými tolerancemi podle GPS (Geometrical Product Specifications = Geometrické specifikace produktu). Z této nejistoty vychází omezení dané přípustným úhlem mezi kontrolovanou plochou a laserovým paprskem. Z toho dále vychází počet reorientací skeneru pro daný prvek a celkové množství měřicích pozic. Omezením této práce je redukce skenovací roviny laserového svazku do jedné středové osy.

2.5.3 Automatizace přípravy pozic měření u skenerů s proužkovou projekcí

Studie zabývající se automatizací v případě použití skenerů s proužkovou projekcí se zaměřují na automatické generování pozic, ze kterých bude provedeno měření zadaného dílu takovým způsobem, aby mohly být provedeny požadované úkony inspekce. Konkrétně se různí autoři ve svých metodách a kompletních aplikacích zaměřují buď na návrh robustních řešení, která budou určena pro široké spektrum měřených objektů nebo na specifické druhy dílů, které vyžadují jasně definovaný přístup k měření.

Autoři Germani, Mengoni a Raffaelli se v sérii studií [40], [26], [25] a [41] zabývají právě návrhem robustního řešení, které je kompletním inspekčním řešením určeným pro kontrolu různých strojírenských dílů. Přístup, který ve svém řešení používají, lze shrnout do následujících bodů:

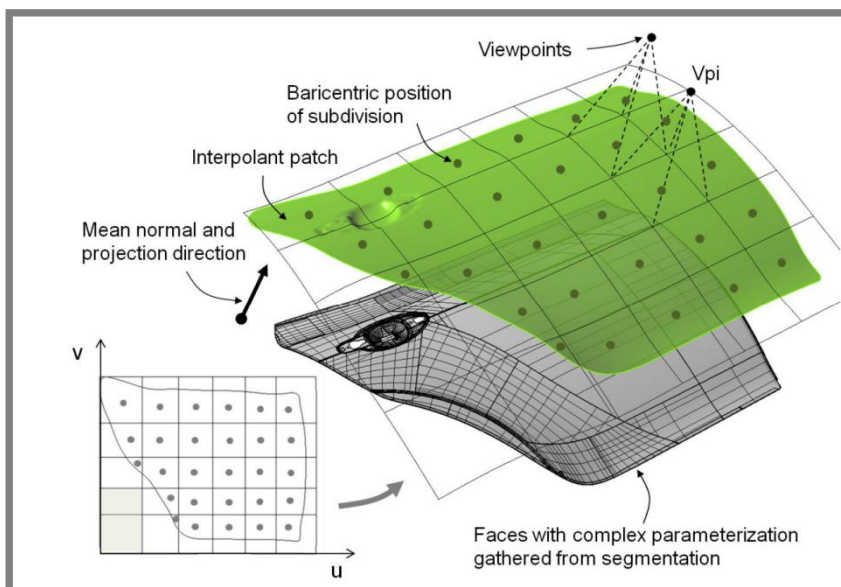
- vygenerování pokusných pozic
- simulace skenování z každé pokusné pozice
- odebrání a optimalizace neuspokojivých pozic
- vygenerování optimální cesty mezi jednotlivými pozicemi.

Pro generování pozic navrhuje několik strategií, které se v průběhu prací vyvíjejí. V prvních pracích je to strategie kulová (pro objekty, které mají objem přibližně stejný jako zorné pole daného skeneru) a plošná (pro velké plošné díly). Ve své poslední práci uvádějí tyto strategie:

- *standardní GD&T inspekce* – vyžaduje kompletní pokrytí prvků, kde jsou tolerance měřeny nebo kde se nacházejí referenční roviny
- *ostříhy a hrany* – používá se pro plechové díly, kde je třeba zajistit kolmé pohledy na tato místa pro přesné určení hran
- *velké plošné díly* – díly s plochami s malou křivostí a s velkým množstvím NURBS ploch (např. karoserie aut, trupy lodí). Cílem měření je analýza křivosti těchto ploch.
- *kompletní tvar dílu* – získání kompletního tvaru dílu je důležité například u plastových nebo plechových dílů, kde dochází k plastickým deformacím vlivem tepla nebo smrštění.

- *poloha konkrétních bodů* – strategie pro přesné určení poloh bodů definovaných z konstrukce. Používané pro ověření sestavitelnosti.

Pro výběr pozic v případě strategie pro kompletní tvar dílu je použit koncept tzv. map viditelnosti, který je blíže popsán v kapitole 2.4.2. U velkých plošných dílů je použit koncept projekce interpolační NURBS plochy. Na základě velikosti zorného pole je pak tato plocha rozdělena a pro části objektu, jejichž projekce spadá do této interpolační plochy, jsou vygenerovány pozice skenování podle jejich průměrných normál (viz Obr. 2-16).



Obr. 2-16 Strategie generování pozic pro ploché díly [25]

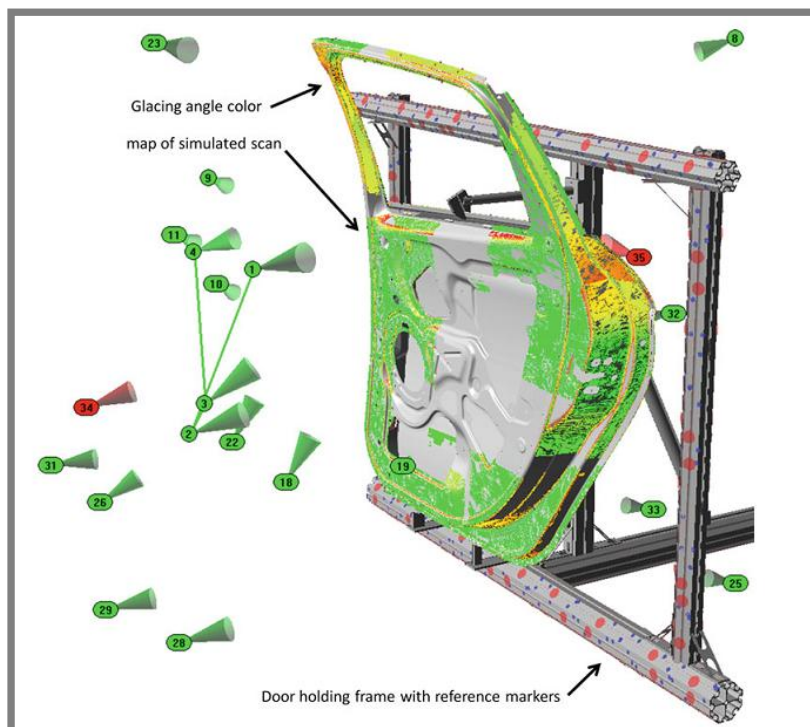
Jednotlivé pozice jsou následně simulovány s využitím polygonální sítě daného dílu a na polygonech sítě jsou ověřovány následující podmínky:

- inkluze v zorném poli skeneru
- kontrola na pozorovací úhel z kamery/projektoru
- viditelnost z kamery/projektoru
- absence odlesků ve směru kamery.

V případě kontroly absence odlesků vyplývá z komunikace s autory práce [25], že je zde tato podmínka zmíněna, ale ve svém výzkumu se jí zatím nezabývali.

Algoritmus iteračním způsobem přidává další pozice pro nepokryté polygony až do jejich kompletního pokrytí. Zahrnuto je stop kritérium, které zastaví iterační proces v případě opakovaného neúspěšného přidání polygonů.

V poslední studii autoři testovali navržený systém na třech komplexních dílech, u kterých byly měřeny diskrétní body na jejich povrchu. Úspěšnost naměření těchto bodů se pohybovala v rozmezí (62 až 91) %. Poměrně nízká úspěšnost je podle autorů způsobena použitím rámu s referenčními body, který omezuje dostupnost a viditelnost (viz Obr. 2-17).



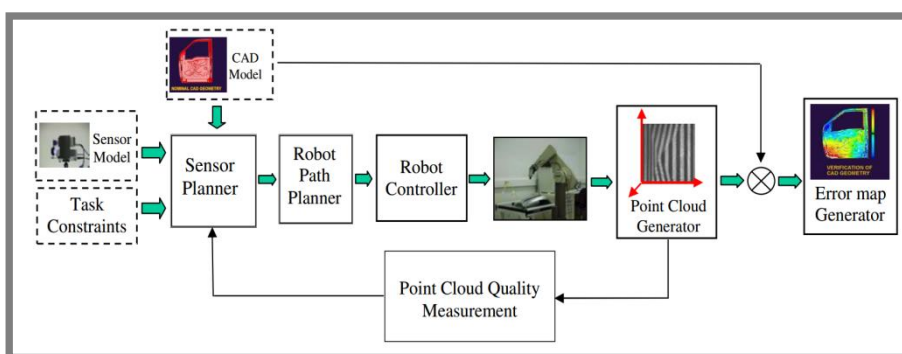
Obr. 2-17 Vypočítané měřicí pozice a simulace měření [25]

Další skupinou autorů, kteří se zabývají touto problematikou, je skupina Shi a kolektiv a jejich práce [24], [42], [43], [44], [45] a [46]. Ve svých prvních pracích [42] a [24] se zaměřují především na problém dělení modelu měřeného dílu na menší oblasti, pro které pak navrhuji způsob stanovení vhodné pozice měření. Zaměřují se na ploché díly, pro které hledají ploché množiny polygonů, které by vytvořily jeden segment, pro nějž by bylo možné nalézt vhodnou pozici. Pokud to není možné, segment je dále rozdělen. V článku [44] je navíc při výběru pozic přidán požadavek na dostupnost robota a váha tohoto požadavku se řeší pomocí inverzní kinematiky robota. V těchto pracích je pro inspekci využívána pouze kamera.

V článku [45] své řešení autoři rozšiřují o použití vlastního navrženého skeneru s proužkovou projekcí, s použitím metody Gray Code Line Shifting. V práci [43] se autoři zaměřují především na kvalitu naměřených dat, která je někdy zanedbávána na úkor rychlosti. Proto se práce zaměřuje na způsoby doplnění chybějících dat vlivem zastínění a odlesků světla (viz Obr. 2-18). Práce řeší tento problém pomocí zpětnovazebného členu (viz Obr. 2-19), který je zapojen přímo do probíhajícího měření a další pozice doplňuje na základě zjištění chybějících dat. V zatím poslední práci [46] se autoři zaměřují na správnou detekci promítaných pruhů na různě kontrastních površích. U nich se zvyšuje nejistota určení správného pruhu (černý/bílý), protože vlivem šumu je poměr intenzit odraženého světla nižší. Jako řešení pro taková místa je vícenásobné měření dané oblasti a zprůměrování dat.



Obr. 2-18 Snímek proužkové projekce se vznikajícím odleskem [43]

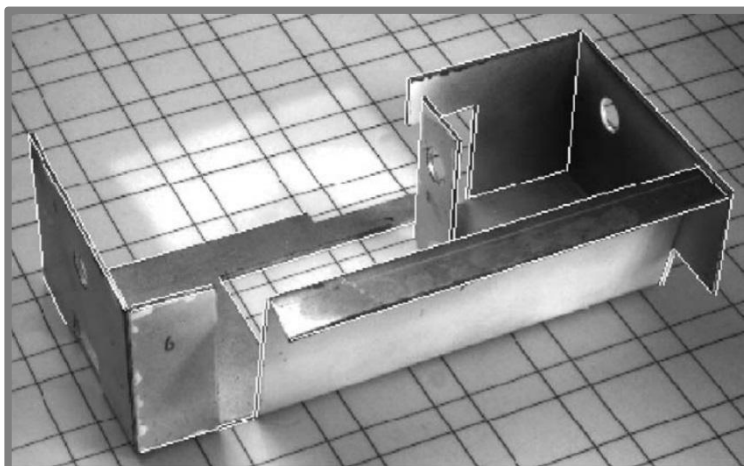


Obr. 2-19 Schéma inspekčního procesu se zpětnovazebným členem, který přidává potřebné pozice měření [43]

2.5.4 Automatizované fotogrammetrické měření plechových dílů

Následující studie úplně nezapadají mezi předchozí studie týkající se automatizace přípravy měřicích pozic, ale jedná se o zajímavý systém pro rekonstrukci a kontrolu plechových dílů založený na fotogrammetrickém měření. V článku [47] je popsán systém využívající čárovou fotogrammetrii a kombinovanou bodově-čárovou metodu zarovnání projekčního svazku. Výstupem systému je 3D CAD model měřeného dílu, který může být použit čistě pro rekonstrukci tvaru nebo pro inspekci deformací. Na uvedeném příkladu dokáže systém spolehlivě zaznamenat deformaci větší než 0,1 mm. Výhodou systému je jeho jednoduchost a levné řešení. Systém vyžaduje pouze CCD kameru, dva vnější zdroje osvětlení a mřížku, která slouží ke kalibraci kamery.

Článek [48] rozšiřuje předchozí studii a zaměřuje se především na složitější tvary (než body a čáry) jako oblouková napojení nebo kružnice. Ze studie vyplývá, že pro rekonstrukci tvaru dílu, která je dostatečná pro následnou inspekci, postačuje 25 snímků tohoto dílu. Kompletní proces zahrnující pořizování snímků až po rekonstrukci do 3D CAD modelu trvá přibližně tři minuty a je plně automatizovaný. Jak je patrné i z Obr. 2-20, je využití tohoto systému omezeno na plechové díly s jednoduchými geometrickými prvky a výraznými hranami. Systém nedokáže rekonstruovat celý tvar objektu a odchylky v plochách a je tak omezen jen pro určité aplikace.

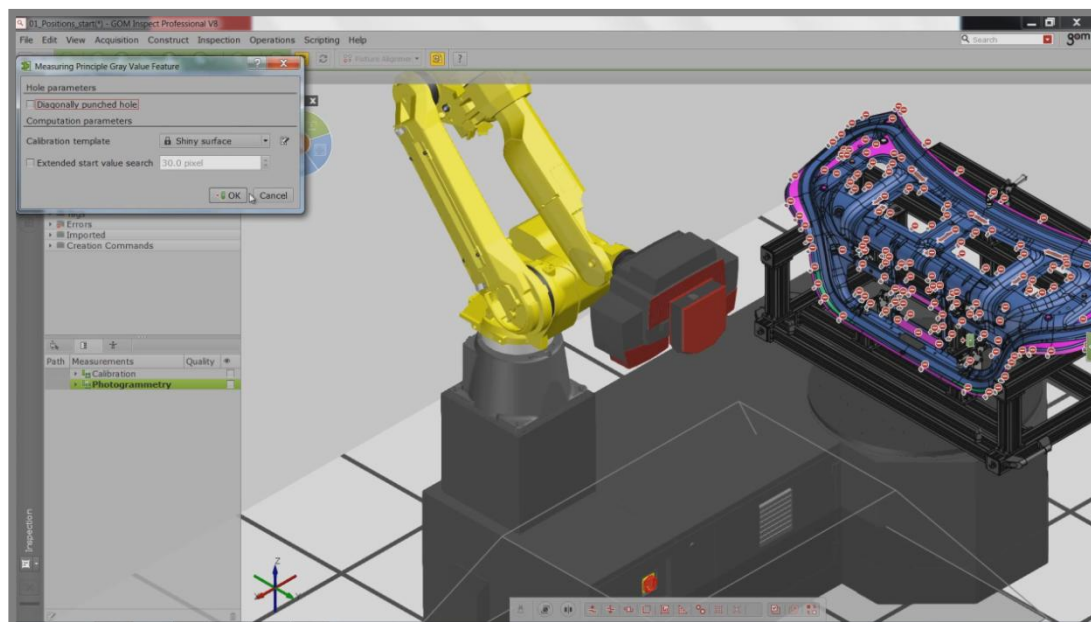


Obr. 2-20 Měřený plechový díl s viditelnými rekonstruovanými hranami [48]

2.5.5 Automatizace přípravy pozic měření od firmy GOM

Německá firma GOM, která je výrobcem a vývojářem optických měřicích systémů a softwaru pro jejich ovládání a zpracování dat, představila v průběhu července 2014 v rámci tří webinářů novou verzi svého softwaru Inspect Professional V8. V rámci posledního webináře [49] uvedli zástupci firmy mimo jiné novinky v automatizaci plánování měřicích pozic při skenování plechových dílů.

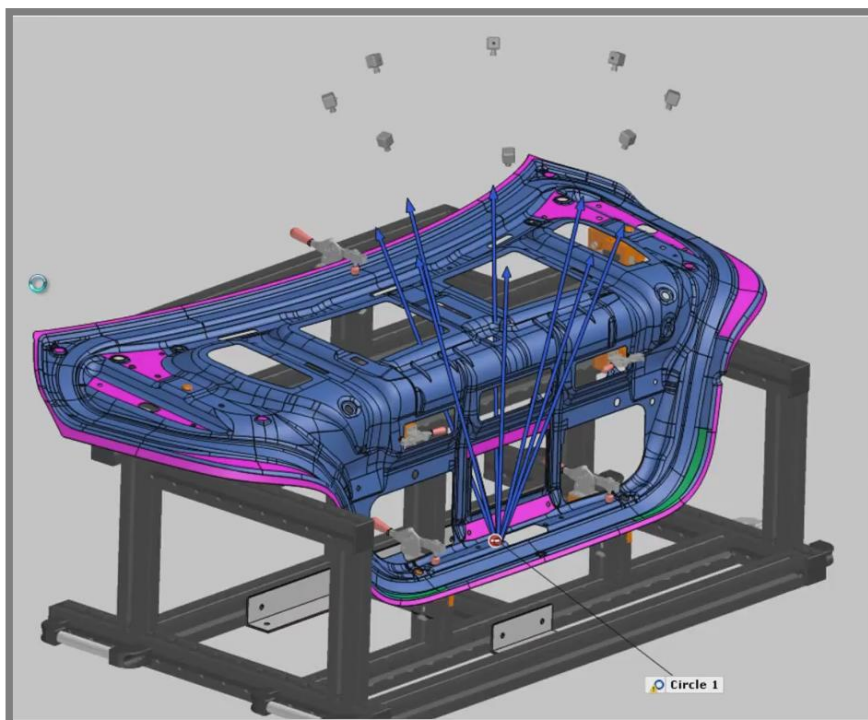
Automatizace je zaměřená na měření výrazných prvků plechových dílů, jako jsou díry, prostřihy, hrany a jednotlivé body na hranách. Obr. 2-21 ukazuje prostředí virtuální místnosti softwaru Inspect Professional, ve kterém probíhá generování měřicích pozic a jejich simulace. Na CAD modelu měřeného dílu jsou patrné vybrané prvky, pro které se mají pozice generovat.



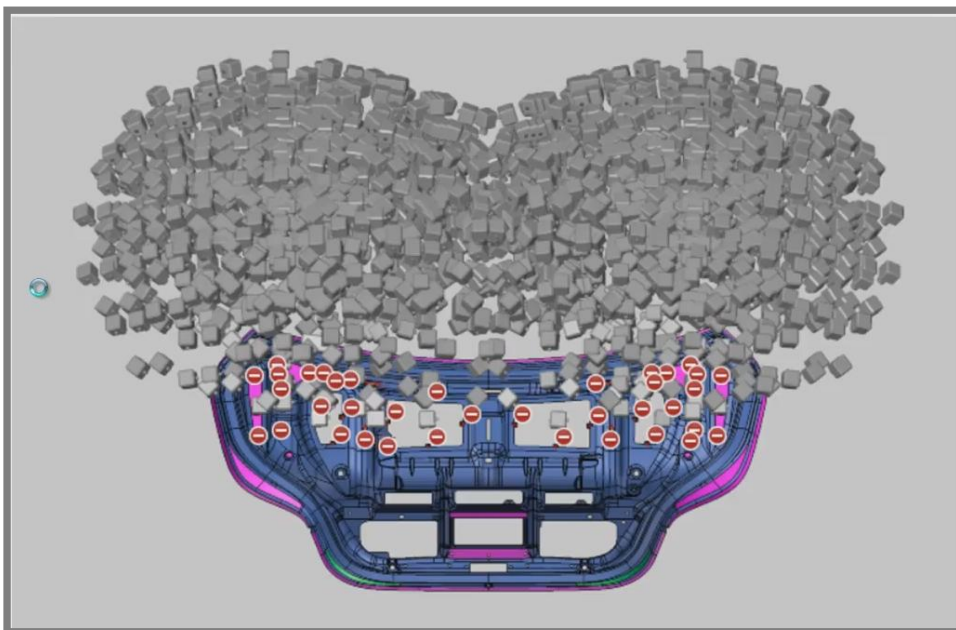
Obr. 2-21 Virtuální místnost softwaru Inspect Professional V8 [49]

Z informací, které byly uvedeny ve zmíněném webináři vyplývá, že generování pozic probíhá tímto způsobem:

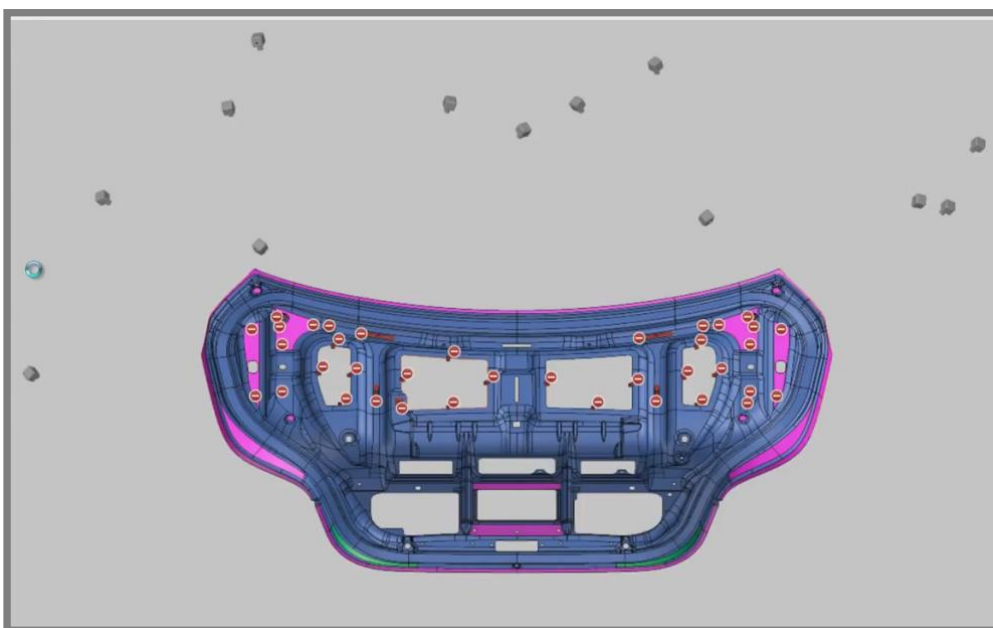
1. Každý měřený prvek je rozdělen do segmentů v závislosti na složitosti. Například pro kružnici (kruhový otvor) je vytvořeno osm segmentů.
2. Pro každý segment je vygenerována jedna měřicí pozice, ze které je možné daný segment zaznamenat (viz Obr. 2-22).
3. Tímto způsobem vznikne (v případě vyššího množství měřených prvků) velké množství měřicích pozic (viz Obr. 2-23).
4. Pozice jsou zredukovány takovým způsobem (přesný algoritmus nebyl popsán), že každý segment musí být viditelný minimálně ze dvou měřicích pozic. Tím vznikne výsledná sada pozic (viz Obr. 2-24).
5. Pro vygenerované pozice se provede simulace i s přesunem mezi jednotlivými pozicemi (řešeno jako TSP). V případě, že je zaznamenána možná kolize při přesunu mezi pozicemi, může být provedena optimalizace cesty s přetříděním pozic nebo bez jejich třídění pomocí vložení mezilehlých pozic.



Obr. 2-22 Pozice vygenerované pro každý segment měřeného prvku [49]



Obr. 2-23 Možné pozice vygenerované pro všechny měřené prvky [49]



Obr. 2-24 Zredukované měřicí pozice [49]

Z komunikace se zástupci firmy vyplynuly některé informace ohledně skenování lesklých plechových dílů.

1. Automatické generování pozic funguje v nové verzi pouze pro vybrané elementy. Generování pozic měření pro celý díl nebo jeho vybrané plochy je v řešení a firma na něm bude pracovat pro další verzi. Podle zástupců firmy je to „běh na dlouhou trať“.

2. Firma na svých webových stránkách [50] uvádí novou funkci softwaru, nazvanou jako „automatická detekce odlesků“. Tato funkce neumožňuje detekci odlesků zahrnout do generování pozic, ale může být použita manuálně až po vygenerování daných pozic na jejich zkontrolování na možné odlesky. V případě, že jsou odlesky detekovány, software vytvoří masku, díky které promítne vzor pouze na část lesklého místa, takže nedojde k vícenásobným odrazům a následně v dalším snímku promítne vzor na zbývající část.
3. Detekce (nebo přesněji predikce) odlesků je závislá na expozičním času, který bude použit u dané pozice měření.

2.6 Metody redukce odlesků

2.6

Problém, který stojí za vznikem přesevřených míst v obraze a zároveň málo osvětlených částí, je nízký dynamický rozsah digitálních kamer, konkrétně použitých čipů CCD nebo CMOS. Dynamický rozsah je v porovnání s CMOS u CCD čipů obecně vyšší, stále ale v porovnání s klasickou fotografií je ve velké části případů nižší. V případě, kdy na jednotlivý pixel dopadne větší množství fotonů, než je schopný nést a převést na elektrický signál (počet elektronů), dochází u tohoto pixelu k saturaci a ztrácí se v něm informace o skutečné barvě.

2.6.1 Snímky s vysokým dynamickým rozsahem (HDR)

Jednou z možností, jak redukovat omezení nízkého dynamického rozsahu, kterým se digitální kamery vyznačují, je využití tzv. HDR snímků. Většinou se jedná o proces zachycení stejné scény při shodných podmínkách, jen s různými expozičními časy. Složením informací z těchto snímků lze docílit výsledného vyššího dynamického rozsahu [51].

Technikami využití HDR snímků v oblasti rekonstrukce tvaru objektu se zabývá řada studií. Část z nich řeší pouze problematiku různé odrazivosti povrchů (tzv. albedo), další část pak přímo problém skenování lesklých objektů.

Autoři Yau a Zhang ve své práci [52] představují metodu nazvanou jako HDRS (High Dynamic Range Scanning = skenování s vysokým jasovým rozsahem). Základem metody je pořízení řady stejných snímků s různými expozičními časy (nebo různou clonou). Na snímcích s dlouhou expozicí jsou dobře zachyceny tmavé oblasti, na snímcích s krátkou expozicí pak světlé oblasti nebo oblasti s vysokou odrazivostí. Pro rekonstrukci prostorových souřadnic je použit algoritmus tříkrokového fázového posunu, s použitým fázovým posunem $2\pi/3$. Ten generuje tři různé promítané obrazy s intenzitami světla:

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\phi(x, y) - 2\pi/3] \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\phi(x, y)] \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\pi/3] \quad (3)$$

kde $I'(x, y)$ je průměrná intenzita, $I''(x, y)$ je modulovaná intenzita a $\phi(x, y)$ je fáze.

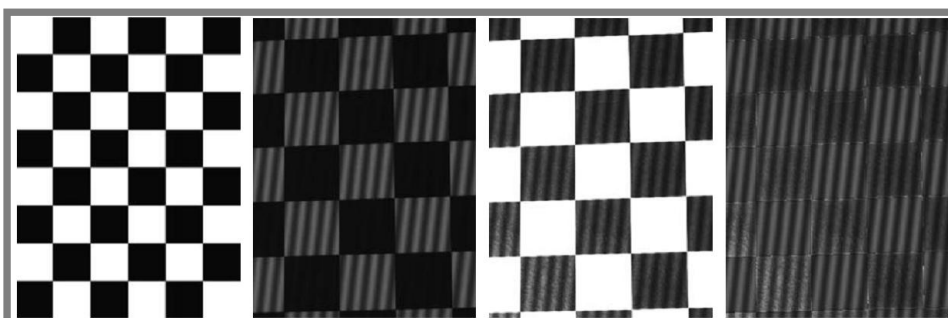
Metoda počítá s pořízením n trojic snímků s různými expozičními časy. Výsledná intenzita každého pixelu se vybírá jako nejvyšší nesaturovaná hodnota pro každou trojici obrazů takto:

$$I_1^f(x, y) = \max\{I_1^n(x, y) | I_1(x, y) < 255, I_2(x, y) < 255, I_3(x, y) < 255\} \quad (4)$$

$$I_2^f(x, y) = \max\{I_2^n(x, y) | I_1(x, y) < 255, I_2(x, y) < 255, I_3(x, y) < 255\} \quad (5)$$

$$I_3^f(x, y) = \max\{I_3^n(x, y) | I_1(x, y) < 255, I_2(x, y) < 255, I_3(x, y) < 255\} \quad (6)$$

Výsledky této metody jsou testovány a prezentovány na černobílé šachovnici (viz Obr. 2-25), kde je patrné, že při nízkém expozičním času jsou dobře zachycena bílá pole a na černých polích není dostatečný kontrast. U vyššího expozičního času je tomu zase naopak. Poslední obrázek ukazuje výsledný složený obraz pro jednu fázi.



Obr. 2-25 Šachovnice s promítnutým vzorem s různými expozičními časy a výsledným obrazem [52]

U dalšího příkladu skenování pomocí této metody, čínské vázy, je použito 23 expozičních časů. V práci není uvedeno, jak dlouho takové skenování trvalo, ale dá se očekávat poměrně vysoký čas a v tom případě hrozí velké nebezpečí vnesení nepřesnosti vlivem pohybu. Protože jsou vybírány do výsledného obrazu pro určení intenzity jednotlivých pixelů intenzity z různých expozičních časů, hrozí při jakémkoliv pohybu vnesení chyby.

Autoři neuvádějí žádné přesnější výsledky metody – celkovou délku skenovacího času a stanovení přesnosti získaných dat nebo porovnání s jinou technikou.

Podobnou metodu představuje studie autorů Skočaje a Leonardise [53], která ale využívá mechanismus výpočtu radiačních map s vysokým jasovým rozsahem. Autoři staví svou metodu na závislosti mezi výslednou hodnotou šedé g pixelu, odrazivosti r odpovídajícího bodu na povrchu tělesa a intenzitě světla l . Výsledná hodnota šedé by tedy měla jít vyjádřit jako:

$$g = r \cdot l \quad (7)$$

Tato závislost bohužel striktně neplatí (alespoň u použitého skeneru) a vztah není lineární. Autoři našli řešení v minimalizaci funkce, do které vstupují intenzita použitého světla l_j , hodnota výsledného osvětlení pro každý pixel g_{ij} a neznámé funkce relativní odrazivosti h_1 a h_2 . Výsledkem je pak možnost výpočtu relativní odrazivosti pro libovolný bod scény pomocí rovnice:

$$r_i = e^{h_1(g_{ij}) - h_2(l_j)} \quad (8)$$

Při použití tohoto přístupu jsou pak hodnoty relativní odrazivosti pro každý bod scény, při různých intenzitách světla, prakticky stejné (normalizovaná směrodatná odchylka je $4,22 \cdot 10^{-3}$).

Následným složením radiačních map z více snímků (jejich počet záleží na rozsahu odrazivosti materiálů na měřeném objektu) je získána radiační mapa s vysokým dynamickým rozsahem a z ní následně hloubková mapa (obraz), ze které je již možné získat prostorové informace o objektu.

Metoda zjevně přináší zlepšení v získání dat při měření objektů s různou odrazivostí povrchu, ale ve zmíněné práci není uvedeno žádné kvantifikační měřítko pro posouzení přínosu navržené metody v porovnání s klasickými metodami.

Práce Jianga a kolektivu [54] nabízí pro řešení problému odlesků a povrchů s různou úrovní odrazivosti velmi podobný přístup jako práce [52]. Svou metodu nazývají HDRFA (High Dynamic Range Fringe Acquisition = Proužkové snímání s vysokým dynamickým rozsahem), také využívají metodu promítání vzoru s fázovým posunem. V jejich případě je použit čtyřkrokový fázový posun $\frac{\pi}{2}$. Složení výsledných snímků probíhá také výběrem vhodných pixelů pomocí masky, která zaručuje výběr pixelů s nejvyšší intenzitou, ale bez saturace. Rozdílné jsou parametry, které vstupují do fáze pořízení snímků, je to kromě času expozice i intenzita světla projektoru. Stanovení těchto parametrů (počet snímků, rozsah expozic, intenzita projektoru) je provedeno pomocí pořízení a analyzování úvodního snímku s rovnoměrným osvětlením měřené scény.

Metoda by měla být odolná vůči okolnímu osvětlení. Autoři tuto schopnost demonstrují na skenování stejného dílu v noci při použití fluorescenčního světla a ve dne za běžného osvětlení. Výsledky jsou v obou případech srovnatelné.

Metoda je experimentálně ověřena na hliníkovém dílu (viz Obr. 2-26) a dále také na dvou kalibračních koulích, kde jsou otestovány dvě sady parametrů. U prvních se mění pouze čas závěrky kamer, u druhých i intenzita použitého světla z projektoru. Druhá varianta dává lepší výsledky a ukazuje tak zlepšení oproti běžněji používané (i v jiných systémech) první metodě.

Uvedená metoda má velmi složitou proceduru a navíc podle informací uvedených v článku, byl čas potřebný pro skenování hliníkového dílu 30 s a bylo pořízeno 144 snímků, což je pro praktické využití neúnosné.

Autoři nicméně v dalším článku [55] přišli s vylepšenou technikou a použitím projektoru s frekvencí 700 Hz. Ve výsledku by tedy mělo dojít ke zkrácení projekčního času o 88 %.



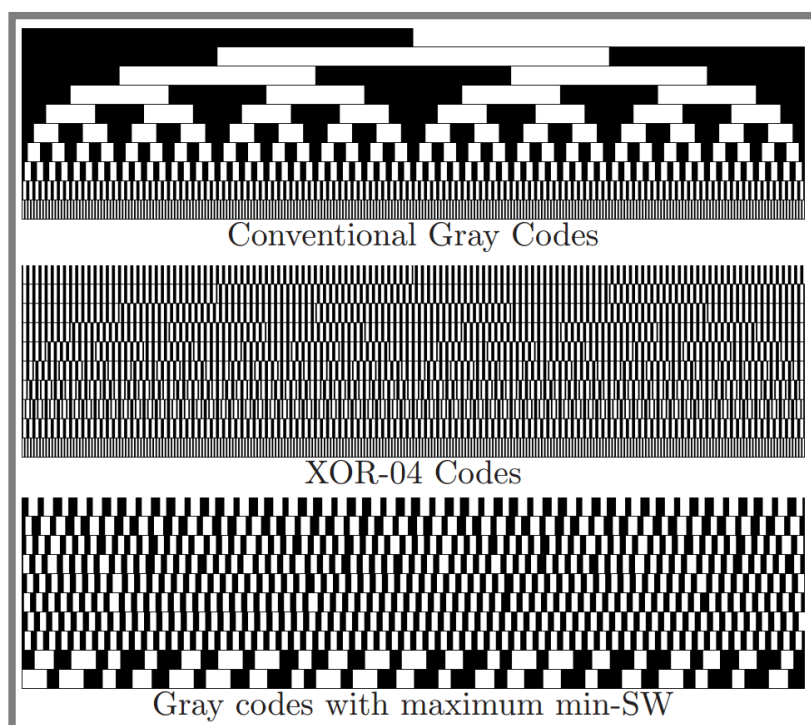
Obr. 2-26 Měření objektu, snímek s vysokým dynamickým rozsahem a výsledná hloubková mapa [54]

2.6.2 Změna promítaného světelného vzoru

Gupta a kolektiv ve své studii [56] analyzuje a rozděluje typy efektů, ke kterým dochází při osvětlení scény a analyzuje vliv těchto efektů na získání informací o tvaru měřeného objektu. Následně navrhuje nové světelné vzory, které tyto negativní vlivy potlačují.

Autoři rozdělují chyby na ty, způsobené efekty dlouhého rozsahu a ty, způsobené efekty krátkého rozsahu. V prvním případě jsou to chyby spojené s difuzí a vícenásobnými odrazy. Ve druhém případě jsou to chyby spojené s podpovrchovým rozptýlením světla a rozostřením zdroje světla. Pro potlačení vlivů efektů dlouhého rozsahu by bylo třeba použít promítaný vzor s vysokými frekvencemi (s co nejúžšími proužky) a naopak pro potlačení efektů krátkého rozsahu by bylo třeba promítaný vzor s nízkými frekvencemi (široké pruhy).

Na základě předchozího požadavku byly pro první případ vytvořeny vzory založené na logickém operátoru XOR², které mají šířku všech pruhů stejnou jako základní binární vzor. V případě použití základního binárního kódu s šířkou 4 pixely, budou mít všechny vzory největší šířku právě 4 pixely (XOR-04). Pro druhý případ byl použit již dříve používaný vzor zachovávající velkou minimální šířku pruhů (max. min-SW). Uvedené vzory jsou na Obr. 2-27.

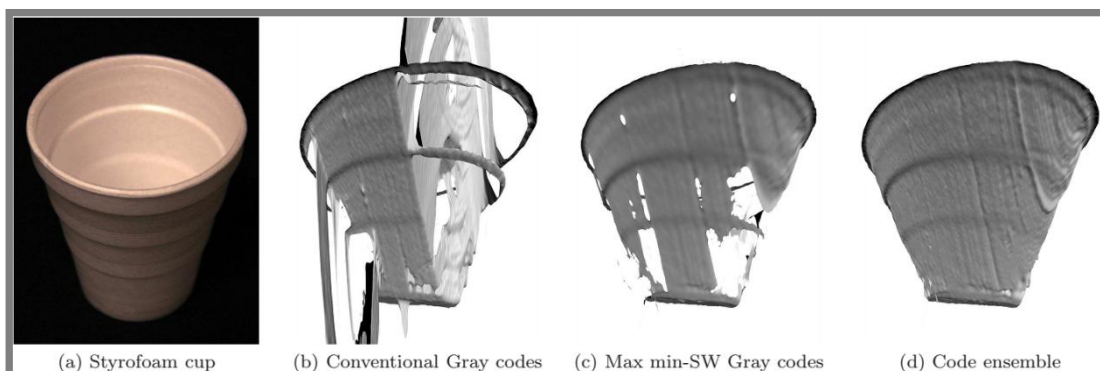


Obr. 2-27 Klasický binární kód a nové kódové vzory XOR-04 a maximum min-SW [56]

Protože jsou tyto přístupy každý vhodný na jiný druh chyb, výsledná sada vzorů se skládá z XOR-02, XOR-04, max. min-SW vzorů a klasického šedého kódování. Porovnáním hodnot výsledné hloubky z těchto čtyř přístupů je určena skutečná výsledná hloubka. V případě chybných pixelů (správná hloubka nemohla být určena žádnou kombinací předchozích vzorů) jsou osvětleny pouze tyto body scény. Tím se

² XOR je logický operátor exkluzivní disjunkce. Nabývá hodnoty *pravda* právě když každá vstupní hodnota nabývá, v porovnání s ostatními vstupy, unikátní hodnoty. [81]

sníží celkové osvětlení scény a zabrání se tak také například vícenásobným odrazům světla.



Obr. 2-28 Výsledky použité metody [56]

Uvedená metoda je velmi dobře a podrobně popsána a především přináší výsledky, které opravdu do určité míry redukuje negativní efekty spojené s lesklými materiály nebo materiály, jimiž částečně prostupuje světlo. Problém bude ve vyšším množství použitých snímků a tedy pravděpodobně delším skenovacím čase. Výsledné skenovací časy u testovacích objektů autoři neuvádějí. Tato jejich metoda je podrobněji rozpracována i dalšími výsledky v práci [57].

2.7 Zmatňování lesklých povrchů

2.7

I když se vyskytují metody, které redukuje vliv odlesků u lesklých povrchů nebo problémy s rozdílnou odrazivostí povrchů, nejedná se zdaleka o vyřešený problém. V případě, kdy je hlavním požadavkem vysoká přesnost získaných dat, využívá se speciálních zmatňujících nástřiků. Jedná se zejména o tyto tři typy:

- oxid titaničitý (TiO_2) v práškové formě
- křídový prášek s hlavní složkou uhličitanu vápenatého (CaCO_3)
- cyklododekanový prášek ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$)

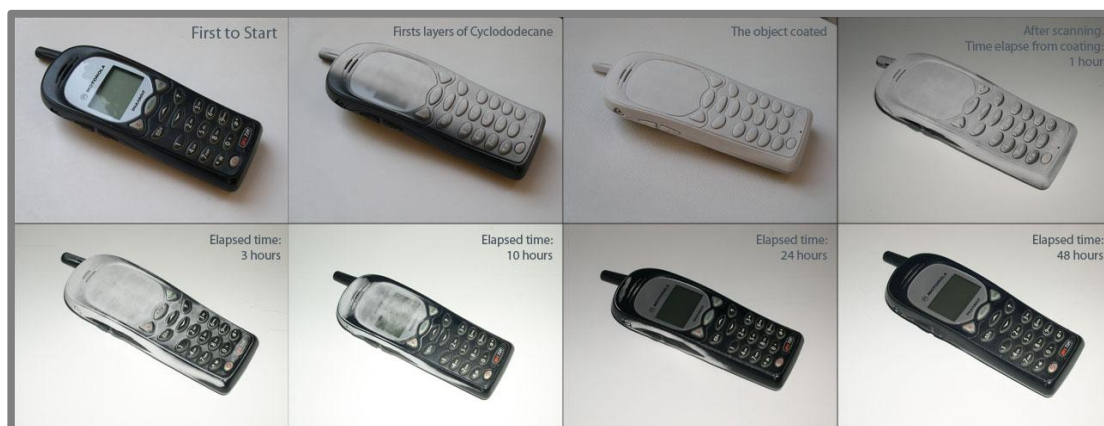
Cílem u jakéhokoliv nástřiku zmatňujícího prášku je nanesení takové vrstvy prášku, která zajistí dostatečné zmatnění povrchu a která zároveň neovlivní svou tloušťkou výsledek měření. Druhý požadavek je prakticky nedosažitelný, protože nanášený prášek vždy přidá na měřený objekt vrstvu o určité tloušťce. Ta je udávána výrobcí u titanového prášku v hodnotě $1\ \mu\text{m}$, u křídového prášku $30\ \mu\text{m}$, u cyklododekanového prášku se tuto informaci nepodařilo zjistit, dá se ale předpokládat obdobná nebo větší tloušťka než u křídového prášku.

Výhody a nevýhody jednotlivých nástřiků shrnuje Tabulka 3.

Tabulka 3 Výhody a nevýhody zmatňujících nástřiků

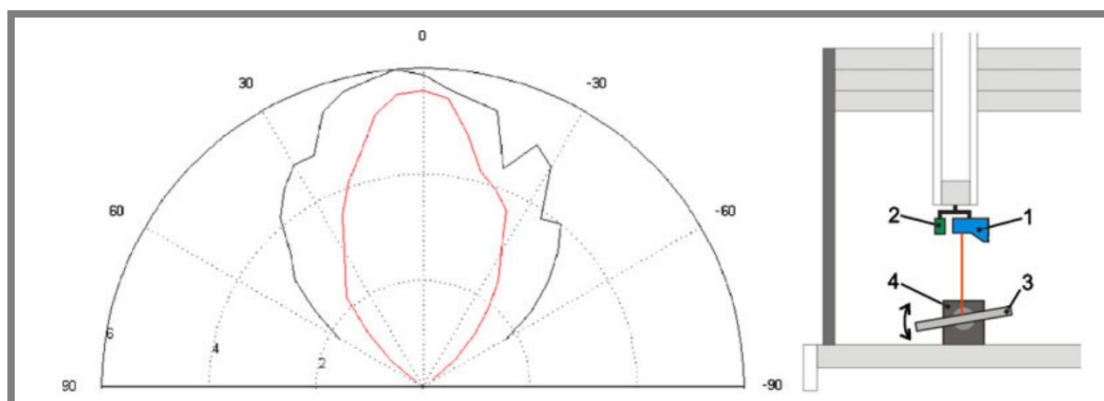
Druh nástřiku	Výhody	Nevýhody
Titan	Tenká nanášená vrstva Nízké ovlivnění měření	Složitý proces nanášení Nevhodný pro velké díly
Křída	Jednoduché nanášení	Velká tloušťka naneseného filmu
Cyklododekan	Samovolné odpaření (viz Obr. 2-29)	Velká tloušťka naneseného filmu „Vlasovitý“ povrch vrstvy

Studiem skutečné tloušťky nanesené vrstvy zmatňujícího prášku jsme se zabývali v práci [58]. Porovnávali jsme skutečnou tloušťku nanesené vrstvy zmatňujícího prášku při opakovaném nanášení na testovací objekty – kalibrační koule, koncovou měрку a válcový kalibrační element. Tato měření byla provedena pro titanový a křídový prášek. Pro titanový prášek vychází výsledná hodnota tloušťky na $5\text{ }\mu\text{m}$, u křídového prášku $44\text{ }\mu\text{m}$. Tyto hodnoty se tak nepatrně liší od výrobcem uvedených hodnot, u titanového prášku je tento rozdíl pětinasobný.



Obr. 2-29 Ukázka odpařování po nástřiku cyklododekanovým sprejem v průběhu 48 hodin [78]

Zmatňující nástřik má vliv jednak na schopnost zachytit povrch v místech, kde by došlo k odlesku světla, ale také na úhel, pod jakým možné skenovat povrch především u kovových objektů. U nich totiž dochází k velmi malému odrazu světla při velkých úhlech dopadu. Vliv zmatňujícího prášku v porovnání s nezmatněným lesklým povrchem na úhel skenování pomocí laserového skeneru zkoumal Vukašinovič v článku [59]. Ve svém experimentu provedl měření intenzity odraženého světla od povrchu skenovaného tělesa (rovinný plochý díl) nejprve s matným červeným nátěrem (červená křivka) a následně se zmatněním křídovým práškem (černá křivka). Výsledkem je graf na Obr. 2-30, který jasně ukazuje přínos nástřiku na úhel, pod kterým je možné skenovaný povrch pozorovat. Je však zaznamenána pouze intenzita odraženého světla a není uvedeno, jaká nejnižší intenzita světla je nutná u daného skeneru pro korektní dekodování promítaného paprsku. Při použití kovového nezmatněného a nenatřeného povrchu se dá očekávat ještě výraznější rozdíl v zaznamenané intenzitě světla při vyšších úhlech.



Obr. 2-30 Relativní intenzita odraženého světla v závislosti na úhlu pozorování [59]

Porovnání vlivu nástřiku zmatňujícího prášku na schopnost zaznamenat povrch pomocí skeneru s proužkovou projekcí při různých úhlech pozorování bylo provedeno v rámci předběžných experimentů k této dizertační práci. Porovnání bylo provedeno pro rovný plechový díl s nástřikem titanovým práškem a bez nástřiku.

Zmatňování dílů v rámci sériové výroby ve většině případů není možné. Záleží na druhu inspekce, ale pokud se například kontroluje každý desátý díl, který se následně vrací zpět a pokračuje k dalším výrobním operacím, není jeho zmatnění většinou možné. Jednak kvůli času a obsluze, která by pro zmatnění byla nutná, ale také kvůli možnému znehodnocení daného dílu zmatňujícím nástřikem. I v případě cyklododekanového nástřiku dochází k jeho odpaření v řádu hodin až dnů.

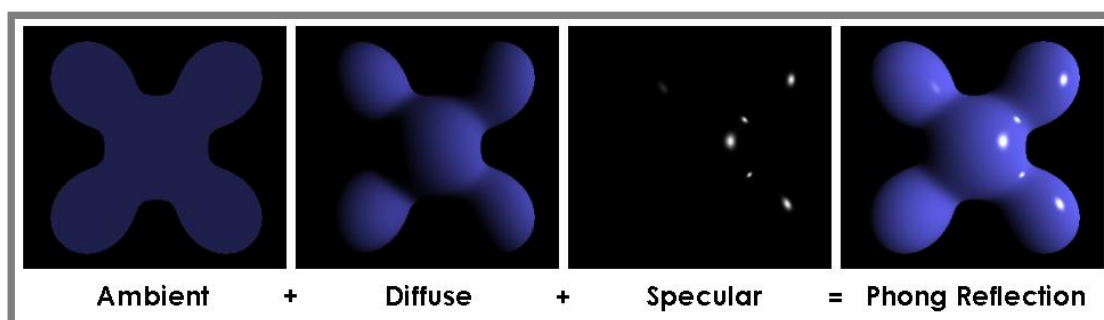
2.8 Osvětlovací modely

2.8

Některé práce zabývající se problematikou plánování snímání se pokoušejí do přípravy pozic měření zahrnout osvětlovací modely, které by simulovaly skutečné podmínky při osvětlení měřeného objektu vnějším zdrojem světla. Jedná se většinou o modely běžně používané v počítačové grafice, z nichž některé jsou fyzikálně založené, jiné jsou založené čistě na geometrických principech.

Zároveň některé práce zohledňují problém proměnného koeficientu difuzního odrazu vyskytujícího se především u kovových materiálů. Ten má vliv na výslednou intenzitu odraženého světla a tím i energii pohlcenou senzorem u snímající kamery. V případě nízké přijímané energie nedojde ve výsledku k naskenování potřebných dat a v opačném případě, při vysoké hodnotě přijímané energie, dojde k saturaci příslušných pixelů a znehodnocení takto získaných dat.

Společné pro většinu osvětlovacích modelů je kombinace tří složek odraženého světla: ambientní, difuzní a lesklé (viz Obr. 2-31³; zobrazeno pro Phongův osvětlovací model, obdobně i pro ostatní osvětlovací modely). Ambientní složka zastupuje světlo dopadající rovnoměrně ze všech směrů okolního prostředí, a která se také rovnoměrně do všech směrů odráží. Difuzní a lesklá složka odrazu reprezentuje osvětlení z externích zdrojů ve scéně. Difuzní složka reprezentuje světlo odrážející se rovnoměrně do všech směrů a lesklá složka reprezentuje výrazné odrazy světla ve směru blízkém zrcadlovému odrazu [60].



Obr. 2-31 Složky odrazu světla - ambientní, difuzní a lesklá [77]

³"Phong components version 4". Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phong_components_version_4.png#mediaviewer/File:Phong_components_version_4.png

2.8.1 Osvětlovací modely využívané v úlohách počítačového vidění

Osvětlovací modely, které se vyskytují v úlohách počítačového vidění, uvádí v úvodu svého článku [61] Nayar. Podle Nayara je možné tyto modely dělit na ty, uvažující pouze difuzní odraz světla a ty, které uvažují i lesklý odraz. V případě modelů uvažujících difuzní odraz se nejčastěji využívá *Lambertův model* pocházející již z 18. století. Tento model je používán například v úlohách, kde se využívá metoda získání tvaru ze změny stínů nebo u fotometrického sterea. Pokročilejším modelem je *Phongův osvětlovací model* [62], který již uvažuje lesklý odraz. Jeho použití je ale vhodné jen v případě, kdy je uvažován hladký povrch tělesa. Phongův model totiž uvažuje lesklý odraz jen v okolí velmi blízkém zrcadlovému odrazu.

Další pokročilejší modely je možné rozdělit do dvou různých kategorií podle přístupu k jejich sestavení. Jsou to modely založené na fyzikálních vlastnostech světla nebo na geometrických vlastnostech optiky. U fyzikálního modelu je tak světlo uvažováno jako elektromagnetické vlnění a vstupuje do výpočtu například vlnová délka světla. U geometrického přístupu toto není uvažováno a jedná se vždy o aproximaci. Významným modelem, který je založený na fyzikálních vlastnostech světla je model *Beckmann-Spizzichino* [63]. Významným geometrickým modelem je model *Torrance-Sparrow* [64]. Nayar na základě své studie rozšířil dříve zavedené rozdělení složek odrazu na difuzní a lesklou na difuzní odraz, lesklý lalok a lesklý hrot. Váha lesklých složek se mění u různých materiálů, ale platí, že lesklý lalok se zvětšuje na úkor lesklého hrotu a naopak. Ze závěrů, ke kterým Nayar dospěl, vyplývá, že Torrance-Sparrow model dobře aproximuje složku lesklého laloku jak je vypočítána i u Beckmann-Spizzichinova modelu. Nedokáže však popsat zrcadlové chování lesklých povrchů, a proto by pro ně neměl být používán.

Dalším známým a využívaným modelem je *Cook-Torrance* model [60]. Ten je úpravou Torrance-Sparrow modelu a dává do vztahu jas objektu a intenzitu a velikost každého použitého světla ve scéně. Obecně se v úlohách počítačového vidění používají častěji modely založené na geometrických vlastnostech světla kvůli jednodušší matematické podobě.

2.8.2 BRDF

Osvětlovací modely, zmíněné v předchozí kapitole (2.8.1), jsou empirickými modely, které různě zjednodušeným způsobem vyjadřují obecně složitou funkci skutečných povrchů, které se snažíme modelovat. Této funkci se říká BRDF.

BRDF je zkratka pro Bidirectional Reflectance Distribution Function, což je v překladu obousměrná distribuční funkce odrazu světla. Jedná se o funkci, která definuje poměr odraženého záření (radiance) vůči ozáření (iradiaci) povrchu v daném směru. Jedná se o charakteristiku daného materiálu, která určuje, jak bude povrch tělesa s daným materiálem vypadat při osvětlení. Zobecněným způsobem ji lze vyjádřit jako [65]:

$$f_r(x, \vec{\omega}_r, \vec{\omega}_i) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{dL_i(x, \vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})d\vec{\omega}_i} \quad (9)$$

kde $f_r(x, \vec{\omega}_r, \vec{\omega}_i)$ je BRDF funkce počítaná pro bod x se světlem dopadajícím ze směru $\vec{\omega}_i$ a odráženým do směru $\vec{\omega}_r$, $dL_r(x, \vec{\omega}_r)$ je diferenciální odražená radiance a $dL_i(x, \vec{\omega}_i)$ je vstupní diferenciální radiance.

2.8.3 Osvětlovací modely v inspekčních systémech

V článku [31] navrhuji autoři BRDF funkci, díky které je možné s využitím naměřených hodnot odrazivosti pro vybrané materiály určit vhodné pozice osvětlení pro dosažení požadovaných hodnot výsledné průměrné hodnoty šedi u výsledného obrazu. Při známém osvětlení je možné zpětně odvodit potřebné parametry kamery (clona, expoziční čas, zaostření) pro optimální provedení daného inspekčního úkonu. Autoři využívají Nayarův [61] osvětlovací model, který je složený ze tří složek odrazu – difuzního, lesklého laloku a lesklého hrotu. Rovnicí může být tento model zapsán následovně:

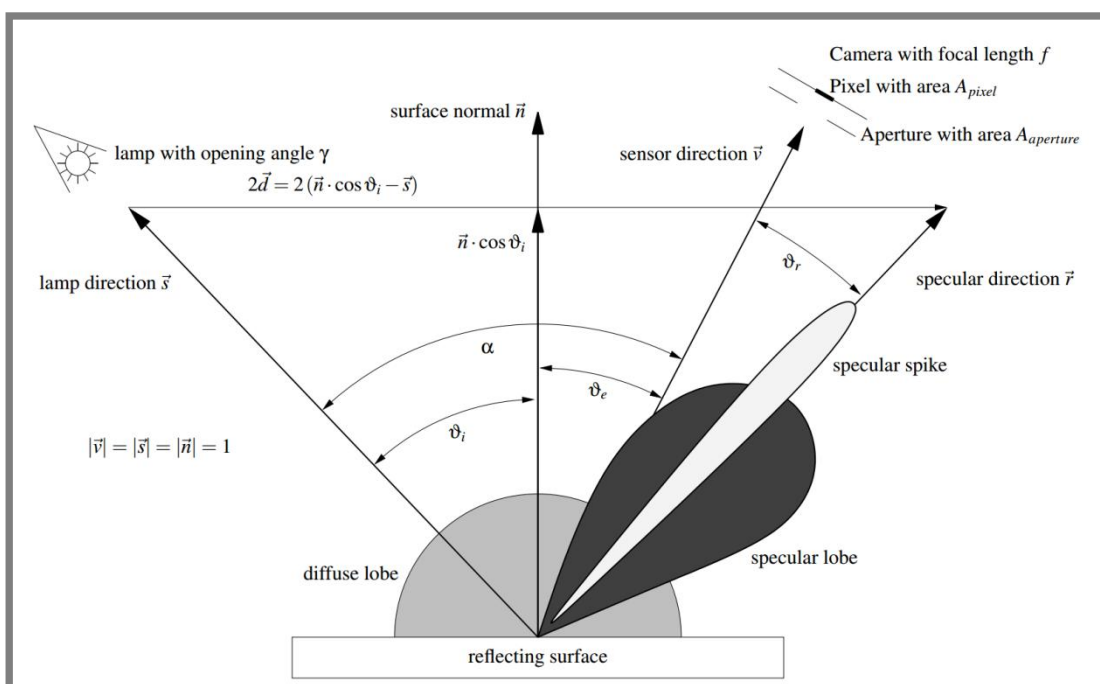
$$R = \rho(\cos\vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1}\vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2}\vartheta_r) \quad (10)$$

kde ρ je koeficient difuzního odrazu (albedo), σ_1, σ_2, m_1 a m_2 jsou koeficienty lesklého odrazu a úhly ϑ_i a ϑ_r vycházejí z Obr. 2-32. Další důležité vzorce slouží k výpočtu hodnoty šedi G , energie získané jedním pixelem P_{pixel} a koeficientu odrazivosti ρ :

$$G = c \cdot P_{pixel} \cdot t \quad (11)$$

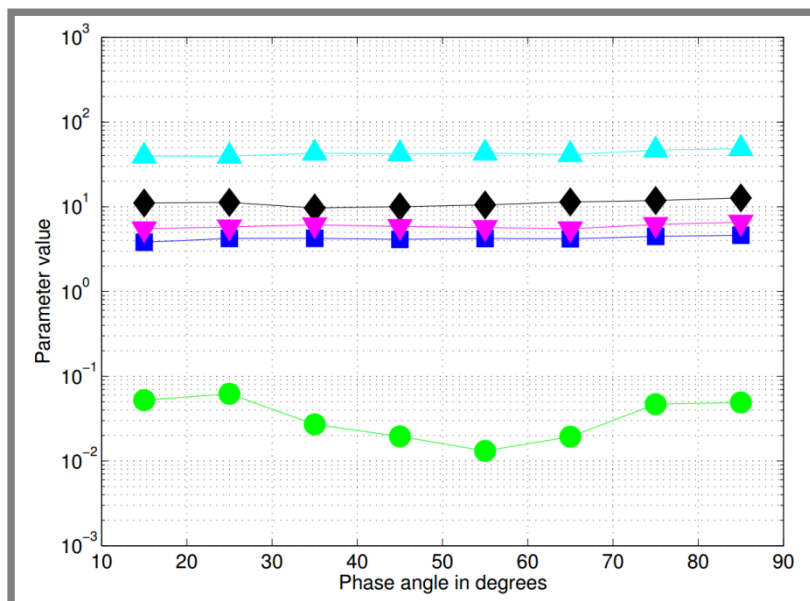
$$P_{pixel} = \frac{A_{pixel} \cdot \Phi_i \cdot R}{8\kappa^2} \quad (12)$$

$$\rho = \frac{A_{pixel} \cdot \Phi_i \cdot P_{pixel}}{8\kappa^2(\cos\frac{\alpha}{2} + \sigma_1 + \sigma_2)} \quad (13)$$



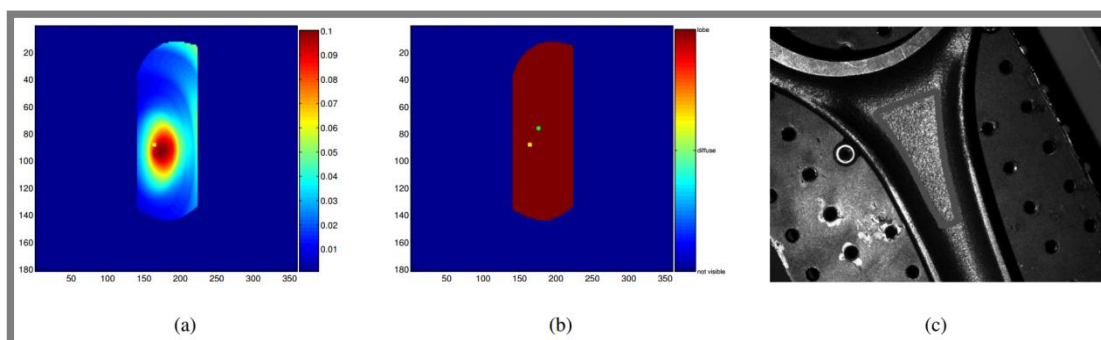
Obr. 2-32 Model odrazivosti tvořený třemi složkami - difuzní, lesklým lalokem a hrotem [31]

Na základě změřených hodnot šedi při různých úhlech α (viz Obr. 2-32) byly pomocí Newton-Raphsonova algoritmu odvozeny hodnoty koeficientů lesklého odrazu. Na Obr. 2-33 jsou uvedeny hodnoty těchto parametrů změřené pro ocelový plech.



Obr. 2-33 Parametry lesklého odrazu pro BRDF u ocelového plechu [31]

Autoři v rámci experimentů představují možnosti využití navržené metody. Využívají k tomu mimo jiné koncept map viditelnosti (popsaný v kapitole 2.4.2). Pro známou pozici kamery je pomocí tohoto konceptu a pomocí vypočítané mapy odrazivosti dopočítána pozice zdroje světla, která zajistí požadovaný převažující typ odrazu. Hledání optimální pozice je řešeno pomocí konvexního programování jako minimalizace účelové funkce. Obr. 2-34 zobrazuje mapu viditelnosti vybraného bodu s namapovanou BRDF, dále segmentovanou mapu odrazivosti s oblastmi představujícími převládající typ odrazu a nakonec skutečný snímek z kamery. Žluté body ve scéně zobrazují pozici kamery, zelený bod pozici zdroje světla.



Obr. 2-34 Mapa viditelnosti s mapovanou BRDF; segmentovaná mapa odrazivosti; skutečný snímek kamery [31]

Navržená metoda vyžaduje znalost řady vstupních parametrů, jako jsou výkon použitého světelného zdroje, veškeré parametry kamery a hlavně také změřené parametry lesklého odrazu a albeda materiálu měřeného dílu. Při jejich znalosti však metoda nabízí silný nástroj k simulaci skutečného chování měřeného dílu z hlediska odlesků světla.

V článku [66] od Weckenmanna a kolektivu se nejedná o plný automatický systém pro generování pozic, ale o asistenční systém, který operátorovi poskytuje optimalizační nástroj pro korekci pozic měření.

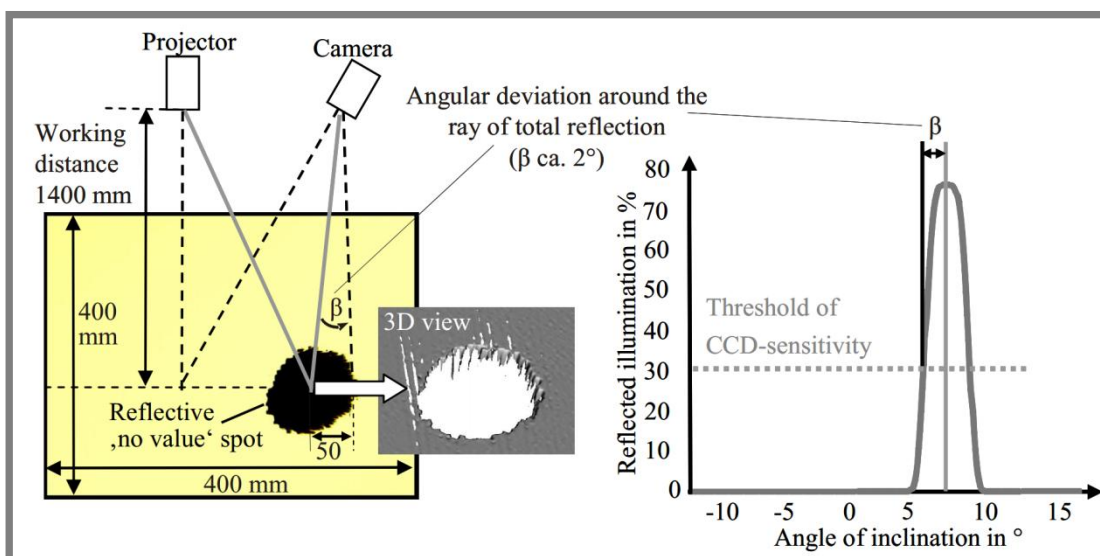
Výhodou je sestavení plně matematicko-fyzikálního modelu měření, který umožňuje určit výslednou nejistotu měření pro každý bod měřeného objektu (při měření z dané pozice). Na základě těchto nejistot může systém vyhodnotit kvalitu připraveného inspekčního uspořádání a optimalizovat je. Měřitkem je zde tedy nejistota měření.

K výpočtu vlivu odlesků je využit fyzikální model BRDF, který zahrnuje klasické tři složky odrazu: ambientní, difuzní a lesklou. Pro difuzní odraz je použit Lambertův model, pro lesklou složku Cook-Torranceův model [60]. Hodnota odraženého jasů je tedy vypočtena podle vzorce:

$$L_r = L_{ambient} \cdot k_{ambient} + \sum_{l=1}^n L_{i,l} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{p})_l \cdot d\omega_{i,l} \cdot \left(\frac{k_{diffuse}}{\pi} + \frac{k_{specular}}{\pi} \cdot \frac{D_l \cdot F_{\lambda,l} \cdot G_l}{(\vec{n} \cdot \vec{p})_l \cdot (\vec{n} \cdot \vec{k})_l} \right) \quad (14)$$

Na základě této vypočítané hodnoty jasů je možné stanovit skutečnou hodnotu osvětlení CCD čipu E_{CCD} . Ta je při porovnání s experimentálně zjištěnou hodnotou maximálního osvětlení E_{max} , při které nedojde k saturaci, vyhodnocena a výsledkem je simulace na Obr. 2-35. Z této simulace je možné vyhodnotit i úhel β , který stanoví velikost oblasti ovlivněné odleskem.

Autoři tímto způsobem řeší problém odlesků (jas světla dopadající na pixel je větší než limitní hodnota), ale neřeší problém málo osvětlených míst (úroveň dopadajícího jasů je menší než prahová hodnota, kterou systém potřebuje pro správné dekódování).



Obr. 2-35 Simulace a výsledek měření lesklého povrchu a osvětlení lesklé oblasti [66]

2.8.4 Sledování paprsku (ray tracing)

Žádný z výše popsaných modelů odrazivosti není schopný postihnout problém vícenásobných odlesků, ke kterým dochází u složitějších povrchů, pokud se paprsek směřující od zdroje světla odráží od povrchu tělesa k dalšímu povrchu (a k dalšímu) a následně do kamery. Tento problém je výrazný například v různých drážkách

a rozích. Problém vícenásobných odrazů uvádí ve svém článku [23] Scott mezi dalšími otevřenými problémy, které se u automatizované rekonstrukce tvaru objektů vyskytují.

Metoda ray tracingu je založena, jak už název napovídá, na sledování paprsku. Používá se v počítačové grafice pro realistické podání scén. Skrze každý pixel obrazovky je vyslán paprsek a sleduje se jeho cesta prostorem. Jedná se tedy o opačný přístup než v případě předchozích metod, kdy se sleduje povrch objektu a určuje se příspěvek výsledného osvětlení z přítomných zdrojů světla ve scéně. Metoda sledování paprsku patří mezi globální osvětlovací techniky [65]. Pokud by se měly sledovat všechny paprsky od všech přítomných zdrojů světla, bylo by to velmi výpočetně a časově náročné. Pokud paprsek vycházející od pozorovatele (skrz pixel obrazovky) neprotíná žádný objekt, přiřadí se mu barva pozadí. Pokud paprsek nějaký objekt protíná, vytvoří se až tři nové paprsky: odrazivý, lámající se a stínový. Odrazivý paprsek pokračuje prostorem podle zákona odrazu a sleduje se stejným způsobem jako první paprsek. Pokud je objekt průhledný, prochází skrze něj lámající se paprsek s podobnými vlastnostmi jako ten odražený. Stínové paprsky směřují ke každému zdroji světla ve scéně. Součtem příspěvků od jednotlivých paprsků vzniká výsledná barva daného pixelu. Ray tracing je rekursivní algoritmus [67].

Protože metoda řeší vícenásobné odlesky, byla by vhodná pro jejich simulaci v případě plánování pozic. Nevýhodou této metody je však vysoká časová náročnost. I to je jeden z důvodů, proč se doposud tato metoda pro řešení odlesků nepoužívá, nebo se nepodařilo najít práci, která by tento přístup použila.

3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

3

Výroba plechových dílů ve velkých sériích je doménou zejména automobilního průmyslu. Zároveň se na kvalitu výroby v této oblasti kladou velmi vysoké nároky. Důsledkem je proto požadavek na vysokou rychlost měření takových dílů (z důvodu nepřerušování sériové výroby) a zároveň požadavek na přesnost měření, aby bylo možné odhalit i drobné nedokonalosti výroby.

V sériové výrobě se tedy začínají využívat pro inspekci plechových dílů optické skenery umístěné na průmyslových robotech s předprogramovanými pozicemi měření konkrétního dílu. Příprava pozic měření je však časově náročná, zkušenému operátorovi může trvat i několik hodin. Především u plechových lesklých dílů musí návrh pozic respektovat vznikající odlesky. Návrh pozic měření nemusí být optimální a vyšší počet skenovacích pozic zvyšuje celkový čas měření, který se u série kusů násobí. Cílem je tedy automatizací dosáhnout rychlejšího návrhu pozic měření, které by zároveň snížily celkový čas samotného měření.

Již v 90. letech byly popsány metody pro automatické plánování snímání, tedy úlohy, kdy je znám počítačový model fyzického dílu a cílem je připravit takové pozice snímání, aby byla splněna požadovaná úloha snímání daného dílu. Zvláště v posledních patnácti letech se tyto metody začaly více uplatňovat v oblasti inspekce strojních dílů a významně v již zmíněném odvětví automobilního průmyslu.

Z uvedené rešerše vyplývá, že vznikají kompletní inspekční systémy, které řeší celý proces od importu CAD modelu měřeného dílu spolu s informacemi o tolerancích, přes generování potřebných pozic měření a samotné automatické měření až po vyhodnocení tohoto měření vzhledem k předepsaným tolerancím. Tyto systémy bývají zaměřeny na specifický typ měřených objektů (např. díly se standardními tvarovými prvky, jako jsou roviny, válce, drážky, apod.) nebo na měření diskrétních inspekčních bodů, které vycházejí z montážních, zástavbových či jiných požadavků.

Část uvedených prací se zabývá skenováním lesklých dílů, kam spadají právě i plechové díly. Značná část publikací se zabývá metodami redukce vlivů odlesků, které mají velký negativní dopad na naměřená data. Tyto práce řeší danou problematiku zatím především v laboratorních podmínkách bez aplikace do inspekčního systému. Zpřesnění modelu, který simuluje skutečné vizuální vlastnosti měřeného dílu, řeší některé z dalších uvedených prací. Ke zpřesnění jsou často využívány osvětlovací modely, od Phongova přes Beckmann-Spizzichino a Torrance-Sparrow až po složitější BRDF funkce. Výpočetně ne příliš náročný a fyzikálně věrný model popsáný Nayarem byl úspěšně použit v jedné z prací pro odlišný druh inspekce a bude ve zjednodušené podobě využit i dále v této práci.

První ze dvou dalších omezení, která vyvstala z rešerše, je jen minimální řešení inspekčních systémů pro dvoukamerové skenery, častější je aplikace na skenery jednokamerové. Druhým omezením je aplikace buď na díly se standardními tvarovými prvky, nebo na plechové díly s nižší tvarovou složitostí.

Lze proto uvést, že zatím chybí systém pro automatický návrh pozic měření tvarově složitějších plechových dílů, který by počítal s dvoukamerovým skenerem s proužkovou projekcí a aplikoval fyzikálně věrný osvětlovací model pro návrh pozic měření a tyto pozice následně i simuloval na dostupnost průmyslového robota. Zároveň není v člancích uvedeno, k jaké shodě mezi simulací měření a skutečným měřením došlo. Hlavním hlediskem je správnost nastavení osvětlovacího modelu.

4 VYMEZENÍ CÍLŮ

Dizertační práce se věnuje návrhu metodiky a vytvoření softwaru pro automatické generování pozic roboticky polohované skenovací hlavy. Ta funguje na principu proužkové projekce a využívá dvoukamerový systém. Metodika je zaměřena na digitalizaci plechových dílů a do generování pozic měření aplikuje pokročilý osvětlovací model. Vstupem navrženého softwaru je CAD model měřeného dílu převedený do podoby polygonální sítě a výstupem kód pro řízení robota, který je použit pro automatické skenování daného dílu. Výstupem jsou zároveň expoziční časy použité pro skenování v jednotlivých měřicích pozicích.

Globální cíl práce:

Globálním cílem práce je návrh a ověření metodiky automatizace procesu 3D digitalizace plechových dílů ve fázi generování měřicích pozic skeneru s využitím průmyslového robota.

Dílčí cíle práce:

1. Návrh metodiky generování pozic skeneru na základě CAD dat výrobku
2. Návrh softwarového řešení metodiky včetně implementace osvětlovacího modelu
3. Simulace dostupnosti skenovacích pozic průmyslového robota
4. Experimentální ověření navržené metodiky

5 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ

5

Na základě uvedených cílů práce byl stanoven metodický přístup k řešení samotné práce. Nejprve byly provedeny předběžné experimenty, které byly publikovány v článku [68]. Následně byly provedeny experimenty sloužící k určení limitujících parametrů pro skenování plechových dílů, které byly použity jako jeden ze vstupů pro navrhovaný software. Popis a výsledky těchto experimentů jsou uvedeny v kapitole 5.1. Hlavní část práce byla věnována návrhu samotného softwaru. Popisu jednotlivých částí softwaru a použitých algoritmů je věnována kapitola 5.2. V kapitole 5.3 je představen postup pro ověření navržené metodiky.

5.1 Experimentální stanovení neznámých parametrů skenování

5.1

5.1.1 Stanovení parametrů použité optiky

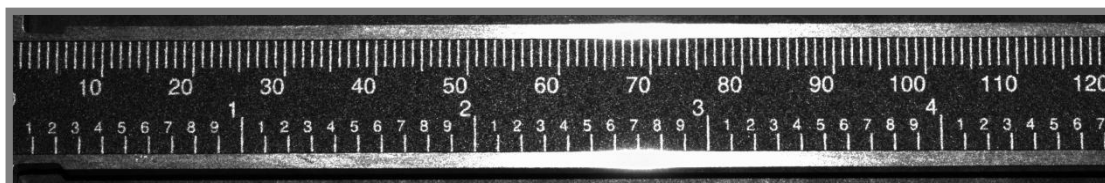
Pro účely návrhu softwaru a kvůli nutnosti zjistit vstupní parametry optiky použitého skeneru bylo nutné tyto parametry experimentálně odvodit. Pro testovací měření byl použit 3D skener ATOS Triple Scan a měřicí optika MV170. Jedná se o sadu tří objektivů, dva objektivy pro kamery a jeden pro projektor. Charakteristické parametry použitých objektivů použitých v případě kamer byly známy jen zčásti. Výrobce skeneru ATOS, firma GOM, používá komerční objektivy firmy Schneider-Kreuznach GmbH, konkrétně je u zvolené optiky použit objektiv Apo-Componon 2,8/40. Parametry tohoto objektivu uvádí Tabulka 4. Firma GOM však uvedené objektivy vybavuje distančním kroužkem, který mění vybrané parametry objektivů a jejich hodnoty jsou tak pro uživatele neznámé.

Tabulka 4 Optické parametry objektivu APO-Componon 2,8/40 [69]

APO-COMPONON 2,8/40	
$f^* = 41,5 \text{ mm}$	$\beta'_P = 1,049$
$s_F = -24,5 \text{ mm}$	$s_{EP} = 15,0 \text{ mm}$
$s'_F = 27,8 \text{ mm}$	$s'_{AP} = -15,7 \text{ mm}$
$HH' = -2,2 \text{ mm}$	$\Sigma d = 28.5 \text{ mm}$

Bylo nutné určit objektovou a obrazovou vzdálenost (d_o , d_i) daného objektivu. Z těchto vzdáleností je možné určit celkovou vzdálenost mezi objektem a obrazem díky známé vzdálenosti hlavních rovin (HH').

U použité optiky je udávána měřicí vzdálenost (490 mm, viz Obr. 5-2), která je však udávána od místa na skeneru k předměťové rovině a neříká tedy nic o vzdálenosti samotné kamery, konkrétně obrazové roviny. Do této vzdálenosti s ideálním zaostřením a s předpokládanou předměťovou rovinou bylo umístěno ve svislé poloze posuvné měřítko (na Obr. 5-1 otočeno). Po pořízení obrazu s posuvným měřítkem byly provedeny následující kroky:



Obr. 5-1 Rozměr odečtený z posuvného měřítka v objektové vzdálenosti

1. Odečtení skutečného rozměru z měřítka: $h_o = 120$ mm
2. Výpočet odpovídajícího rozměru z počtu pixelů (2243 px) a rozměru pixelu ($5,5 \mu\text{m}$): $h_i = 12,3365$ mm
3. Sestavení soustavy dvou rovnic o dvou neznámých ze zobrazovací rovnice a rovnice příčného zvětšení:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (15)$$

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (16)$$

Po odvození pro d_o a d_i dosazení známých hodnot získáme hodnoty objektové a obrazové vzdálenosti $d_o = 445,164$ mm a $d_i = 45,767$ mm. Ze znalosti vzájemné vzdálenosti hlavních rovin ($HH' = -2,2$ mm) byla odvozena vzdálenost mezi objektem a obrazem:

$$d_t = d_o + d_i + HH' = 445,167 + 45,767 - 2,2 = 488,731 \text{ mm} \quad (17)$$

Sensor	Camera position	Measuring areas										Calibration objects	
		Name	Measuring volume (MV) (L x W x H) in mm	Measuring point distance	Recommended reference points mm Ø	Measuring distance	Camera angle	Camera eccentric stop (see 3.1.1)	Camera cover		Focal length camera lenses	Focal length projector lens	Name (CC = cross, CP = panel)
									ATOS II Rev. 02 ATOS I III Rev. 02	ATOS II Rev. 02 800 ATOS I III Rev. 02 800			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	Standard calibration objects, Alternative calibration objects			
ATOS III Rev. 02, ATOS III Rev. 02 800	400	1400	1400 x 1050 x 1050	0.399	8	1530	15	2) b or c	B	H	20	20	CC40/MV1400
		1000	1000 x 750 x 750	0.332	5	1280	18		B	H	20	24	CP40/MV1000, CC30/MV1000x1000
		700	700 x 530 x 520	0.213	3	830	27		B	H	20	24	CP40/MV700, CC30/MV700
		560	560 x 420 x 420	0.176	3	830	27		B	H	24	30	CP40/MV560, CC30/MV500x500
		320	320 x 240 x 240	0.104	1.5	830	27		B	H	40	50	CP40/MV320
		170	170 x 130 x 130	0.053	0.8	830	27		D	H	75	90	CP40/MV170
	SO	320	320 x 240 x 240	0.095	1.5	490	28	a	C	H	24	30	CP40/MV320
		170	170 x 130 x 130	0.055	0.8	490	28		C	H	40	60	CP40/MV170
		100	100 x 75 x 70	0.031	0.8	490	28		C	H	60	90	CP40/MV100
		60	60 x 45 x 35	0.017	0.8	490	28		C	H	90	120	CP40/MV60
		38	38 x 29 x 15	0.012	0.8	490	28		C	H	105	150	CP40/MV38

Obr. 5-2 Parametry pro skenovací objemy skeneru ATOS Triple Scan [79]

Z tabulky na Obr. 5-2 vyplývá ještě další důležitá hodnota, a to hloubka ostrosti. Ta má v případě optiky MV170 hodnotu 130 mm. Měřicí objem je symetrický kolem ohniska, objekt je tedy dostatečně zaostřený (pro potřeby skeneru) 65 mm před a 65 mm za ohniskem.

V případě využití jiného měřicího objemu by bylo nutné proces odvození hodnot d_o , d_i a d_t provést obdobným způsobem znovu.

5.1.2 Stanovení parametrů osvětlovacího modelu

Pro simulaci skutečných podmínek odrazivosti povrchu skenovaného dílu byl zvolen osvětlovací model popsáný v článku [31]. Ten využívá řešení popsané u Nayara [61], kde se celkový model skládá ze tří složek odlesků: difuzního, lesklého laloku a lesklého hrotu (viz Obr. 2-32 v kapitole 2.8.3). Přístup zde uvedený byl upraven do zjednodušené podoby z důvodu použití některých konstantních parametrů, které se vyskytují v rovnicích (11), (12) a (13). Těmi jsou κ (konstantní clona) a α (úhel mezi

zdrojem světla a kamerou). Naopak proměnné, které úroveň šedé ve výpočtu ovlivňují, jsou: d_t (vzdálenost mezi objektem a obrazem), ϑ_e (úhel mezi směrem kamery a normálou povrchu) a ϑ_i (úhel mezi zdrojem světla a normálou povrchu). Upravenou rovnici pro výpočet úrovně šedé, která vychází z článku [31], je možné zapsat:

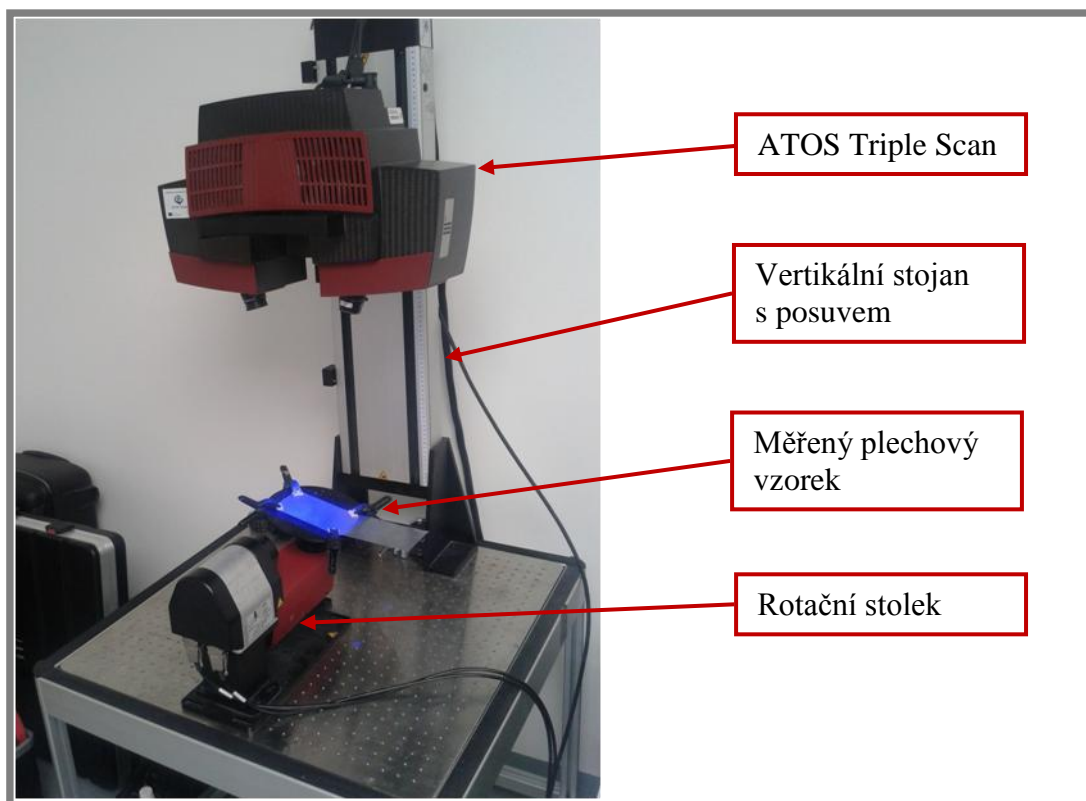
$$G = \frac{k_1 \cdot R \cdot t}{d_t^2} \quad (18)$$

Pro výpočet dvousměrné odrazové funkce je použit vzorec:

$$R = \rho(\cos \vartheta_i + \sigma_1(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_1} + \sigma_2(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_2}) \quad (19)$$

Postup pro výpočet parametrů osvětlovacího modelu pro materiál testovacího plechového dílu, tedy ocelový plech žárově pozinkovaný, byl následující:

1. Provést měření s uvedeným rovným plechovým vzorkem umístěným na rotačním stolku umožňujícím náklon ve vzdálenosti d_t od skeneru. Skener byl umístěn na vertikálním stojanu s posuvem (který nebyl využit). Plechový vzorek byl umístěn tak, že při náklonu zůstala vzdálenost ke středu vzorku konstantní. Měřicí aparatura je na Obr. 5-3.
2. Experimentálně určit hodnoty šedé v 8bitových obrazech získaných z měření při konstantním osvětlení z projektoru a to při expozičních časech t v rozpětí (4 – 512) ms a úhlech ϑ_i (úhel zdroje světla vůči normále povrchu) v rozpětí (0 – 80)° a při konstantní vzdálenosti d_t . Průměrná hodnota šedi byla počítána z oblasti (17 × 17) px, stejně jako v uvedeném článku. Obrázky z měření při úhlu 0° v celém rozsahu expozičních časů jsou na Obr. 5-4.
3. Využitím aproximace pomocí metody nejmenších čtverců (*lsqcurvefit* v Matlabu) proložit hodnoty šedi pro jeden expoziční čas a všechny úhly ϑ_i (Tabulka 5, vždy jeden řádek hodnot)

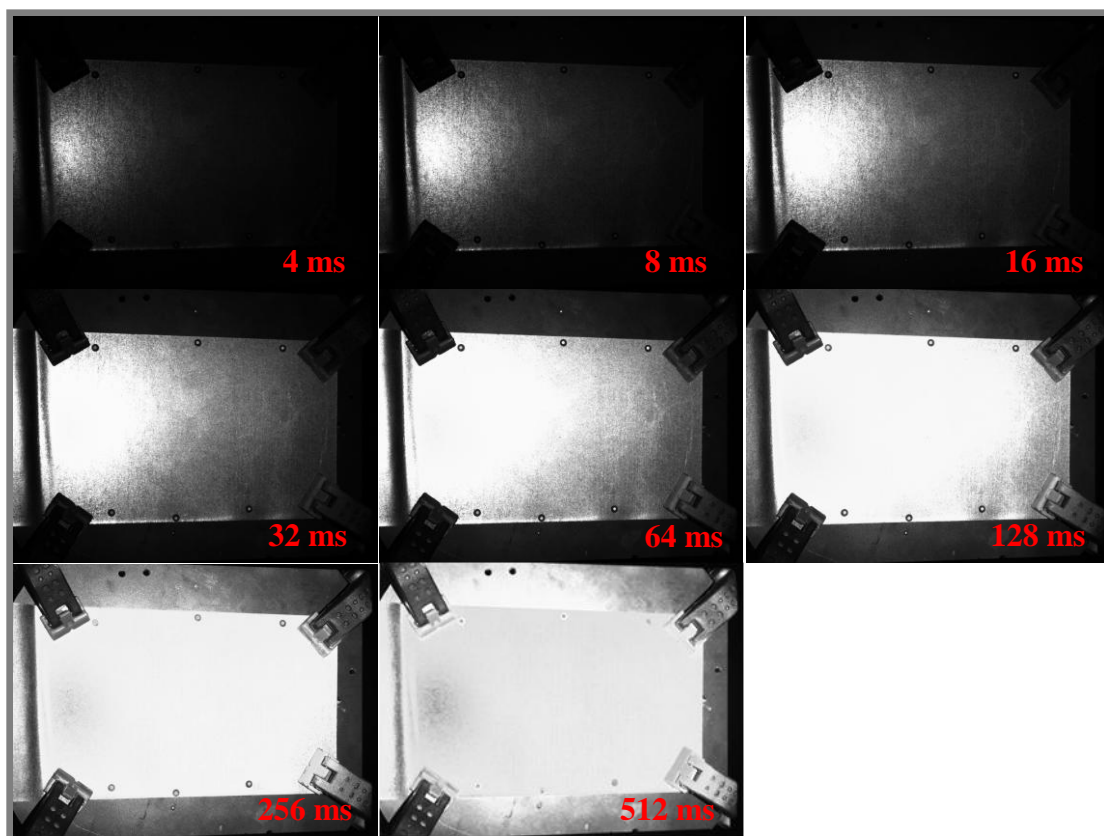


Obr. 5-3 Uspořádání měřicí aparatury pro zjištění parametrů osvětlovacího modelu

Tabulka 5 Průměrná hodnota šedé⁴

Exp. čas [ms]	Úhel θ_i [°]									
	0	6,85	10	20	30	40	50	60	70	80
4	17	247	98	6	2	1	1	1	0	0
8	35	252	179	12	5	3	2	1	1	0
16	70	251	244	24	9	5	4	2	2	1
32	141	250	251	49	19	10	7	5	3	2
64	239	247	249	98	37	21	15	10	7	4
128	248	241	246	193	75	42	29	20	14	7
256	243	230	240	238	151	85	59	40	27	15
512	234	206	227	223	212	168	118	81	55	29

⁴ Hodnoty šedé u úhlů 0-20° od určitých hodnot klesají. To je způsobeno softwarovým zpracováním obrazu v použitém softwaru (ATOS – GOM), aby se neprojevovala saturace pixelů (viz expoziční časy 256 a 512 ms na Obr. 5-4). Při nižších expozičních časech však tyto hodnoty odpovídají a je to prokázáno také zdvojnásobením hodnoty šedé při dvojnásobném expozičním čase.



Obr. 5-4 Měření rovného plechu v úhlu 0° a časech expozice 4-512 ms; měření úrovně šedi

K odvození parametrů osvětlovacího modelu byla pro funkci *lsqcurvefit* v Matlabu upravena rovnice (18) a (19) do podoby:

$$G(\vartheta_i) = K(\cos \vartheta_i + \sigma_1(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_1} + \sigma_2(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_2}) \quad (20)$$

Proměnné použité pro odvození parametrů osvětlovacího modelu pomocí této rovnice a již odvozené parametry jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 6). Hodnoty odvozených parametrů jsou uvedeny tučně.

Tabulka 6 Parametry osvětlovacího modelu pro výpočet hodnoty šedé

Symbol	Hodnota	Popis
k_I	99	konstanta (zahrnuje konstantní hodnoty κ , α , c , A_{pixel} , P_L , ρ použité pro výpočet v [31])
K	1,67	konstanta (zahrnuje konstantní hodnoty d_t , k_I , t použité ve vlastním výpočtu)
d_t	488,731 mm	vzdálenost mezi objektem a obrazem
ρ	neznámé ⁵	albedo (koeficient difuzního odrazu)
ϑ_i	viz Tabulka 5	úhel mezi zdrojem světla a normálou povrchu

⁵ koeficient difuzního odrazu nemohl být z důvodu své povahy v rovnici (19) přímo vypočten, je zahrnut v konstantě k_I

ϑ_e	$(\vartheta_i - \alpha)$	úhel mezi kamerou a normálou povrchu
α	13,5°	úhel mezi zdrojem světla a kamerou
σ_1	11,63	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
σ_2	135,59	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)
m_1	13	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
m_2	164	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)

5.1.3 Stanovení rozsahu hodnot šedé pro korektní dekodování

Ze samotné hodnoty šedé ve snímku není patrné, kdy dojde ke správnému dekodování promítaného vzoru v tomto místě a tedy naskenování geometrie. V softwaru ATOS je možné zobrazit u jednotlivých záběrů skenování snímek z tohoto skenování a na něm v růžové barvě zobrazená místa, kde došlo ke korektnímu dekodování a naskenování. Toho bylo využito pro stanovení rozsahu hodnot šedé, při nichž dojde k naskenování povrchu.

Postup k tomu byl následující:

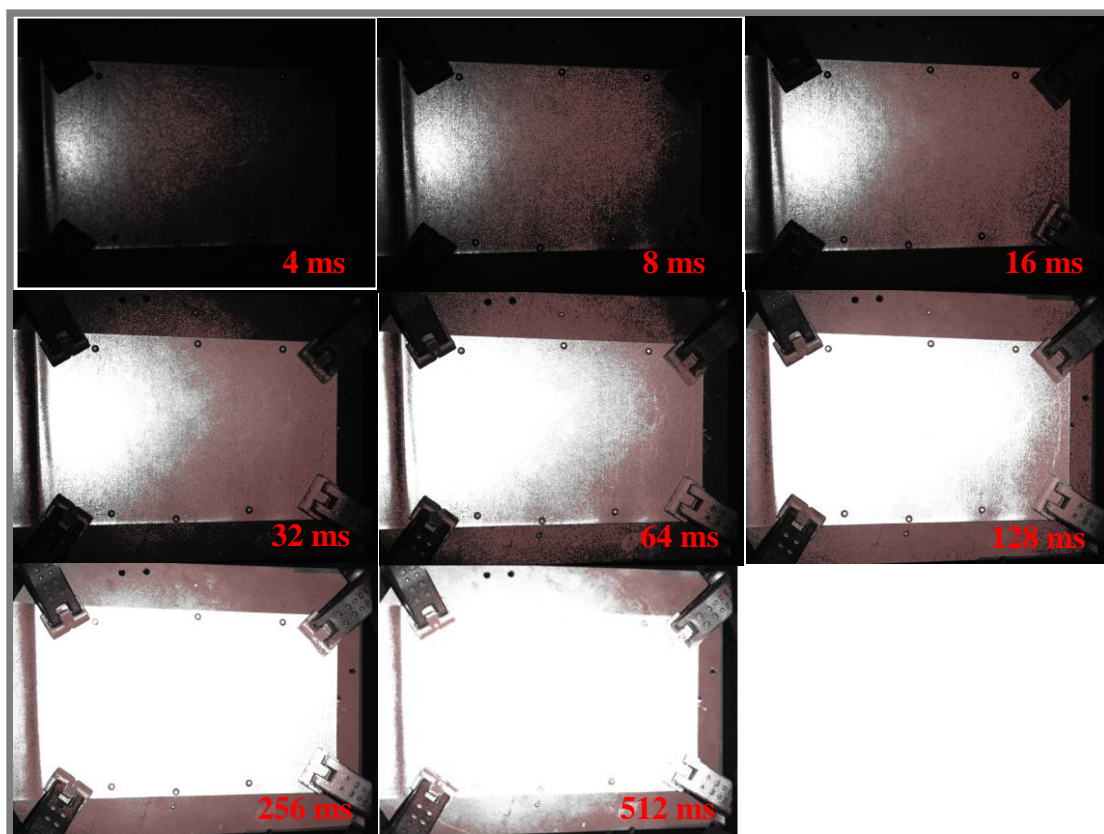
1. Ze stejných měření provedených v předchozí kapitole 5.1.2 byly získány snímky s překryvem růžové barvy v místech, kde se data naskenovala (viz Obr. 5-5).
2. Ze snímků pro skenování byl vyříznut čtverec uprostřed snímku s rozměrem (17×17) px a v tomto čtverci byl vypočten poměr pixelů překrytých růžovou barvou vůči všem pixelům čtverce (viz Tabulka 7).
3. Hodnoty z Tabulka 7 pro jednotlivé úhly skenování ϑ_i byly proloženy křivkami Gaussova rozdělení (viz Obr. 5-6). Z těchto křivek byly odečteny hodnoty expozičního času pro hodnoty naskenovaných dat v úrovni 0,3. Hodnota 0,3 byla zvolena jako dostatečná pro naskenování v takové úrovni, kterou po polygonizaci dat získáme uzavřenou síť. Výpočet byl proveden jen pro úhly, u kterých bylo dostatečné množství dat pro proložení křivkou (0° , 20° , 30° , 40° , 50°).
4. Úroveň šedé je lineárně závislá na expozičním času, jak je i přibližně vidět v tabulce (Tabulka 5). Z rovnic této lineární závislosti pro každý úhel skenování byly dosazením expozičních časů určeny limitní hodnoty úrovně šedé, při kterých dojde k naskenování v úrovni 0,3. Tyto hodnoty byly zprůměrovány přes všechny úhly (viz Tabulka 8). Stejným způsobem je také určena průměrná hodnota šedé pro naskenování maximální úrovně dat.

Výsledkem výpočtu jsou tedy limitní hodnoty šedé pro naskenování dat a hodnota šedé, při které dojde k maximálnímu naskenování dat. Hodnoty jsou použity v následující, po experimentech upravené podobě, u osvětlovacího modelu popsaného dále v kapitole 5.2.8:

$$G_{min} = 29$$

$$G_{max} = 130$$

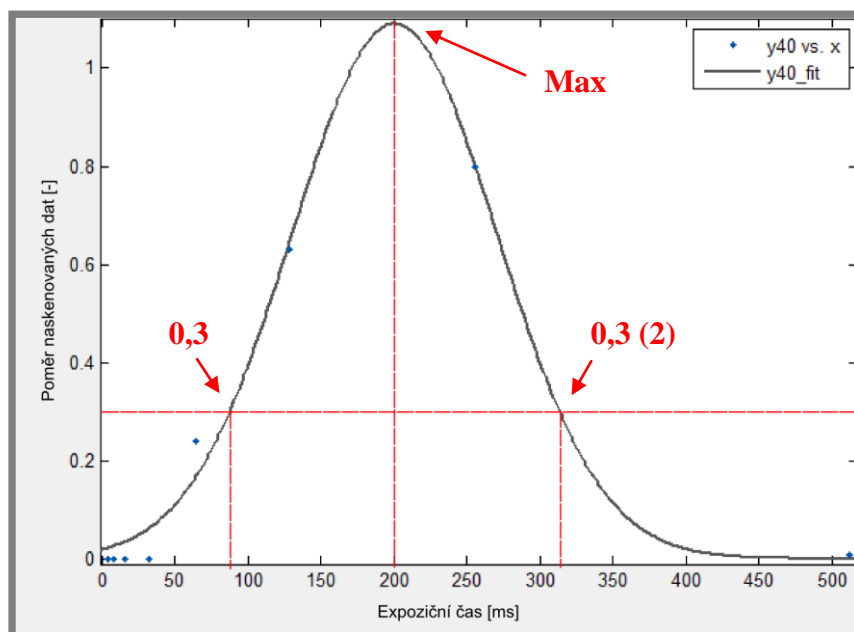
$$G_{ideal} = 74$$



Obr. 5-5 Měření rovného plechu v úhlu 0° a časech expozice 4 - 512 ms; růžově jsou zvýrazněny naskenované body

Tabulka 7 Poměr naskenovaných bodů

Exp. čas [mm]	Úhel θ_i [°]									
	0	6,85	10	20	30	40	50	60	70	80
4	0,16	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,81	0,00	0,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,47	0,00	0,00	0,65	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
64	0,00	0,00	0,00	0,94	0,69	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
128	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,63	0,17	0,00	0,00	0,00
256	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,80	0,42	0,52	0,00	0,00
512	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,42	0,56	0,00	0,00



Obr. 5-6 Proložení hodnot pro poměr naskenovaných bodů v závislosti na expozičním času; na obrázku pro hodnoty úhlu ϑ_i 40°

Tabulka 8 Hodnoty šedé odpovídající úrovni naskenovaných dat a expozičním časům

Úhel skenování	Úroveň skenovaných dat	Odpovídající hodnota šedé	[ms]	Průměrné hodnoty	Odpovídající hodnota šedé
0°	0,3	21,6477	5	0,3	28,92246
	0,3 (2)	154,6587	35	0,3 (2)	138,6149
	Max	79,2858	18	Max	73,70046
20°	0,3	21,4558	14		
	0,3 (2)	137,4794	91		
	Max	78,7142	52		
30°	0,3	23,9186	41		
	0,3 (2)	171,6823	292		
	Max	57,4745	98		
40°	0,3	28,9648	88		
	0,3 (2)	102,9223	313		
	Max	65,7792	200		
50°	0,3	48,6254	212		
	0,3 (2)	126,3316	550		
	Max	87,2486	380		

5.2 Návrh metodiky a její implementace v navrženém softwaru

K vývoji softwaru pro přípravu pozic 3D skenování je využit software Rhinoceros, vyvíjený společností Robert McNeel & Associates. Rhinoceros je software určený k plošnému i objemovému 3D modelování. Zároveň však nabízí pokročilé funkce pro práci s polygonálními sítěmi, nástroje pro renderování nebo nástroje pro tvorbu

výkresové dokumentace. Software Rhinoceros byl zvolen i z toho důvodu, že je pro návrh obdobného automatizačního softwaru použit i v člancích [40], [25].

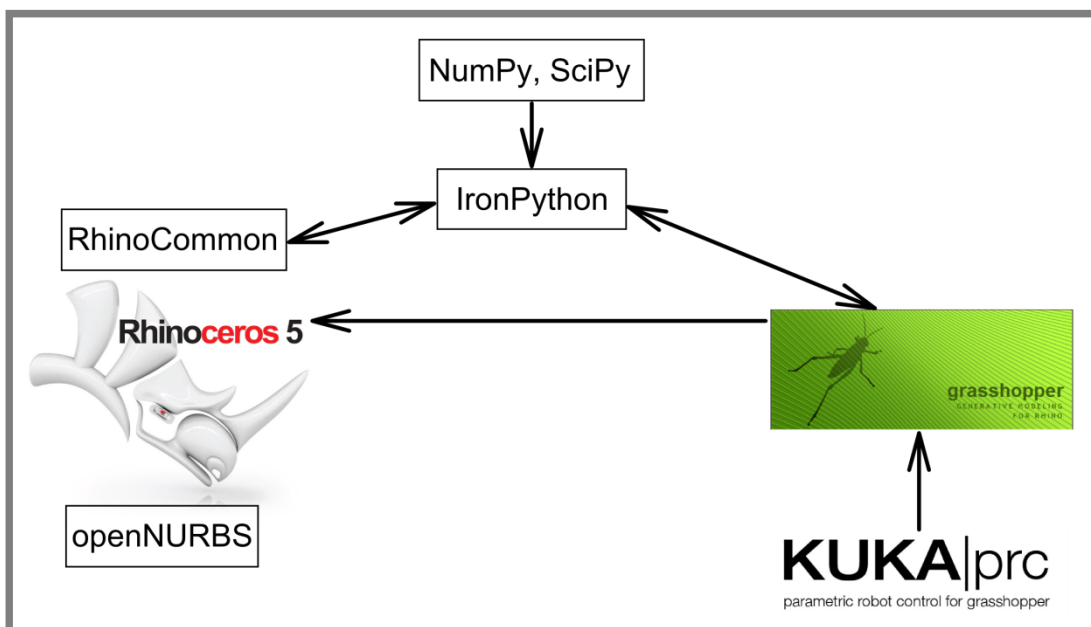
Tým vývojářů softwaru Rhinoceros nabízí k dispozici SDK (Software Development Kit = Vývojářský balíček) založený na platformě .NET. SDK se jmenuje RhinoCommon a umožňuje multiplatformní (Windows, Mac) tvorbu modulů pro Rhinoceros v programovacích jazycích VB.NET, C# a Python (přesněji IronPython). RhinoCommon využívá knihovnu openNURBS, která umožňuje práci s 3DM soubory a obecně s 3D geometrií (NURBS, ale také polygonálními sítěmi, atd.).

K přípravě softwaru byl zvolen jazyk Python a to pro svou relativní jednoduchost oproti zbývajícím dvěma jazykům, pro předchozí zkušenosti autora práce s tímto jazykem a také pro možnost tvorby jednodušších skriptů. Ty byly užitečné zejména ve fázi testování a přípravy dílčích částí finální aplikace.

Pro řešení některých výpočtů je využívána knihovna NumPy. Ta je určena pro jazyk Python, ale je z velké části psána v jazyce C a poskytuje nástroje pro práci s maticemi, které jsou výpočetně velmi efektivní. Umožňuje tak například provádět výpočty týkající se obrazu, jako je změna měřítka nebo morfologické operace. Jelikož se v rámci softwaru Rhinoceros využívá IronPython, implementace jazyka Python do prostředí .NET, byly využity i existující upravené knihovny NumPy a Scipy pro tuto platformu. Tyto knihovny upravila firma Enthought Inc., která spravuje i standardní knihovnu SciPy.

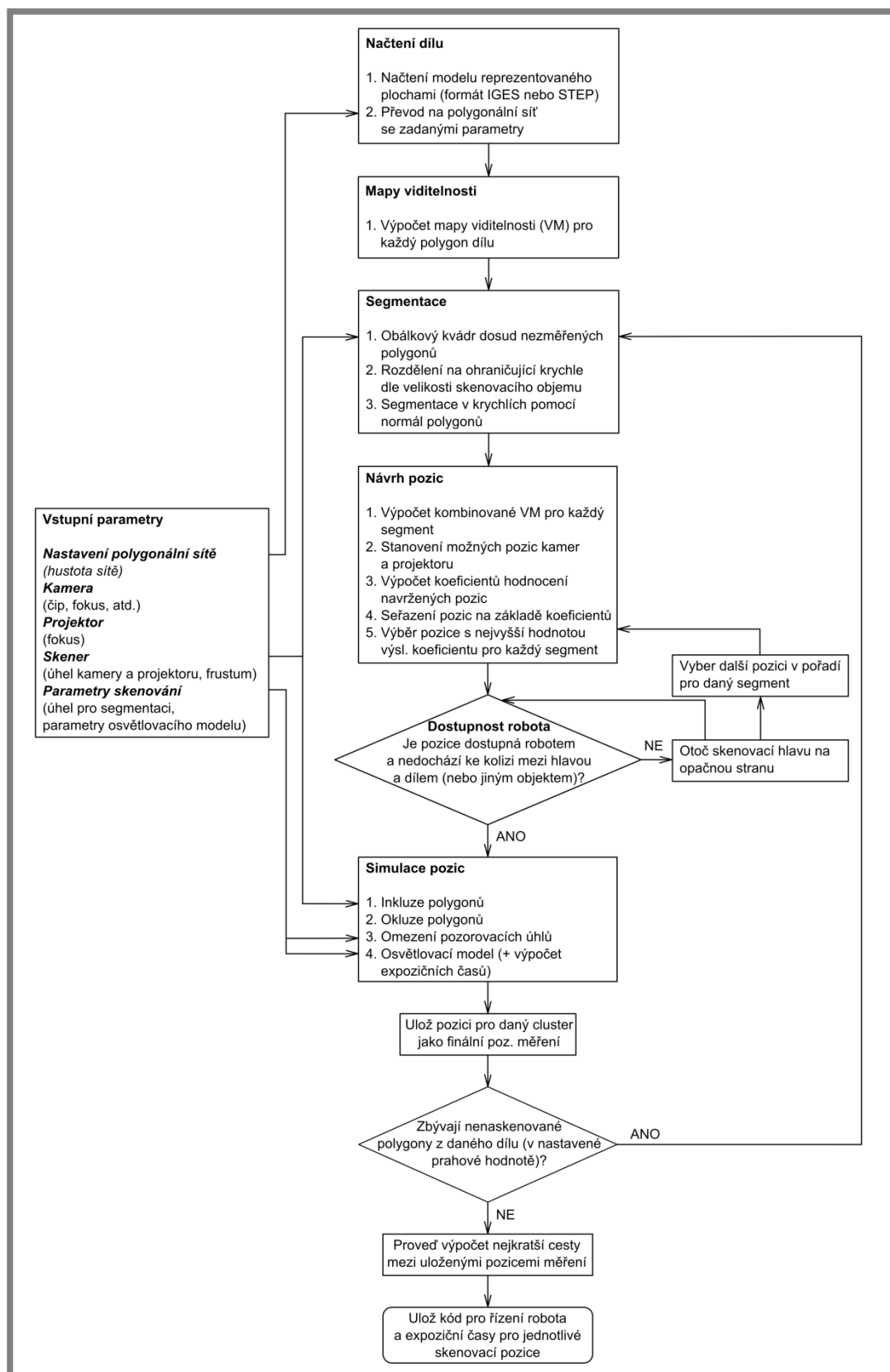
Pro návrh pozic robota a jejich simulaci byl využit KUKA|prc, modul pro Grasshopper. Grasshopper je grafický algoritmický editor vytvořený jako modul pro Rhinoceros.

Struktura využitých knihoven a pluginů je znázorněna na Obr. 5-7



Obr. 5-7 Využívané knihovny a moduly a jejich vzájemné propojení

5.2.1 Diagram navržené metodiky řešení problému



Obr. 5-8 Diagram vytvořeného softwaru

5.2.2 Reprezentace měřeného dílu

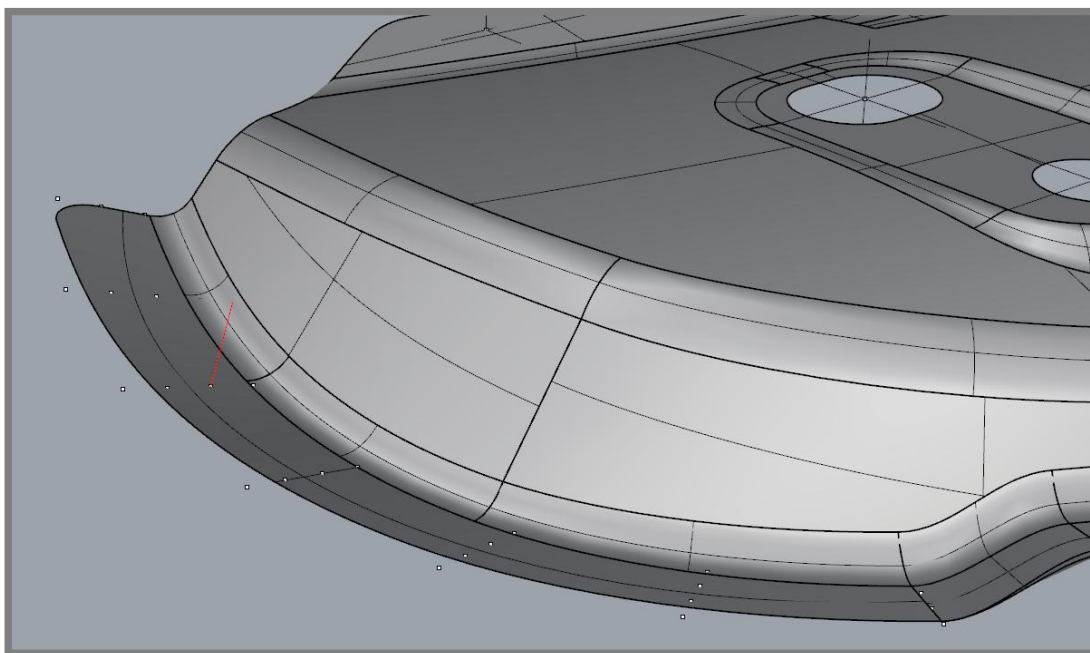
Importovaná data dílu obsahují pouze jeho geometrii. Navrhovaný software není kompletním inspekčním systémem, ale systémem zaměřeným na získání skenovaných dat pro následnou inspekci, a proto by byla data s předepsanými rozměrovými a geometrickými tolerancemi zbytečná. Na vstupu je možné načítat model v řadě přenosových formátů (STEP, SAT, IGES, atd.). Jako vstupní formát byl zvolen STEP z důvodu menší chybovosti při načítání do softwaru Rhinoceros ve srovnání s formátem IGES, jehož je STEP nástupcem a jeho specifikace je stanovena normou ISO.

Model testovaného dílu, používaného v dalších částech práce, byl vytvořen v softwaru CATIA. Tento díl je používán jako příkladový pro návrh aplikace a následné testování.

Pro práci s modelem se nabízejí dvě možné reprezentace:

1. Plošný model tvořený NURBS plochami
2. Polygonální síť tvořená troj a čtyřúhelníky

V případě první možnosti vzniká tento model rovnou při importu STEP modelu do prostředí softwaru Rhinoceros. Výhodou této možnosti je zachování přesného tvaru modelu. Pro další práci s modelem je nutné získat jeho popis pomocí bodů na jeho povrchu a normál v těchto bodech. K tomu jsou v případě plošného modelu využity tzv. Greville body. Jedná se o body, které vzniknou jako průměr množin uzlových bodů řídicího polygonu dané NURBS plochy, promítnuté do plochy samotné. Hustota těchto bodů závisí na změnách křivosti dané plochy. To je na jednu stranu velmi výhodné, body vhodně opisují změny křivosti celého tělesa, na druhou stranu mají plochy s nízkým stupněm křivosti velmi málo bodů, což je pro další účely nevýhodné. U takových ploch by se muselo provést dodatečné zhuštění řídicích bodů. Protože se zároveň jedná většinou o ořezané plochy, je nutné vyhodnotit, zda dané Greville body leží v neořezané části plochy. Greville body jedné plochy a normálu v jednom z těchto bodů je vidět na Obr. 5-9.

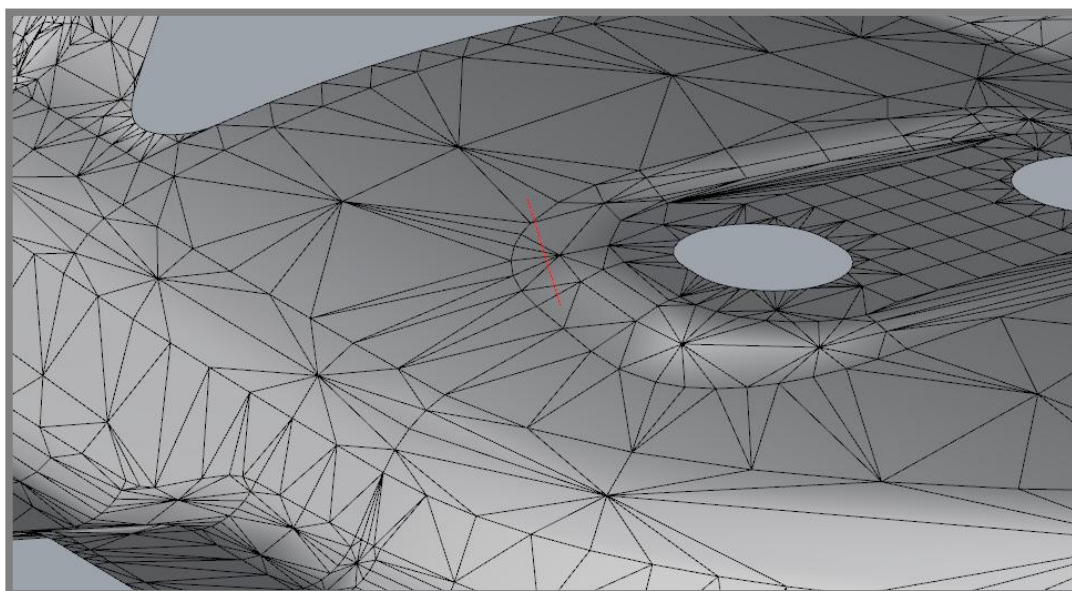


Obr. 5-9 NURBS reprezentace modelu měřeného dílu s Greville body a normálou v jednom bodě

U druhé možnosti, reprezentace pomocí polygonální sítě, je nevýhodou to, že detail modelu velmi závisí na hustotě generované sítě. Především v místech s vysokým stupněm křivosti může být reprezentace pomocí trojúhelníků nepřesná. Důsledkem tedy je, že síť je velmi hustá a další práce s ní je náročná nebo v případě řídké sítě se ztrácí popis. Generování polygonální sítě v softwaru Rhinoceros je možné řídit v závislosti na křivosti a tudíž je možné zachovat poměrně přesný detail při zachování nízkého počtu polygonů. Výhodou polygonů je na druhou stranu to, že jejich rozložení je hustší a rovnoměrnější než u Greville bodů. Snadno je možné získat body tvořící tyto polygony nebo také středy polygonů a jejich normály (viz Obr. 5-10). Další výhodou je možnost určení plochy polygonů, což je uplatněno dále v části 5.2.4.

Další výhodou polygonální reprezentace je jednoduchost výpočtu průsečíku paprsku s polygonem, což je také uplatněno v části 5.2.4. Polygonální reprezentace je také výhodná pro simulaci vypočítaných měřicích pozic, část 5.2.8.

Z uvedených důvodů byla zvolena reprezentace modelu pomocí polygonální sítě.



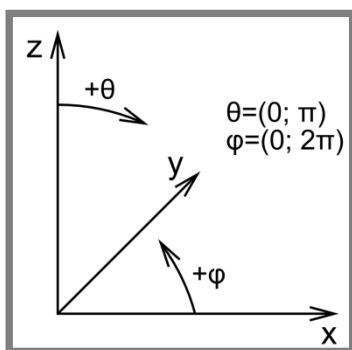
Obr. 5-10 Model reprezentovaný polygonální sítí s vyznačenou normálou u jednoho polygonu

5.2.3 Segmentace měřeného dílu

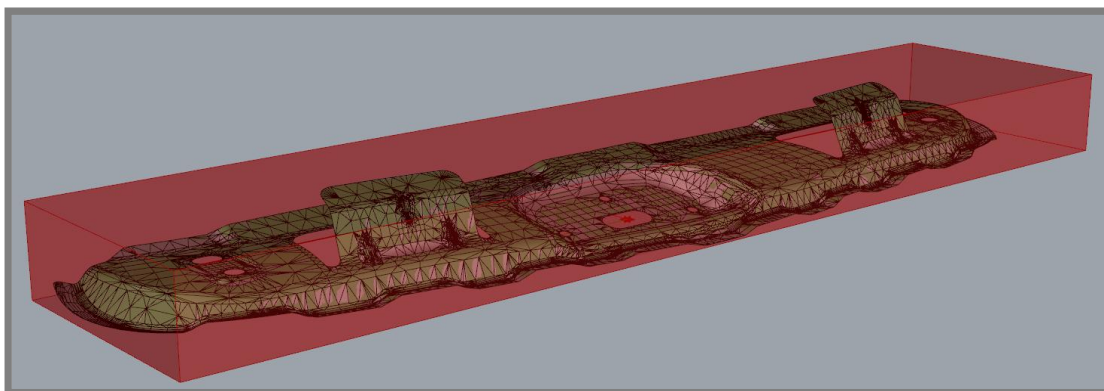
Pro účely určení vhodných pozic měření je nutné celý díl rozdělit na oblasti, které bude teoreticky možné zachytit na jeden záběr skeneru. V kapitole 2.4.1 byly uvedeny metody segmentace, které byly použity v některých studiích zabývajících se problematikou plánování snímání. V uvedené práci se počítá se skenováním plechových dílů s komplexnějším tvarem. Zároveň to znamená, že se jedná o díly, které mají převážně plošný charakter (rozměry dílu jsou výrazně větší v jednom nebo dvou rozměrech vůči třetímu rozměru a díl je reprezentovaný plochou, nikoliv objemem) a díl se měří pouze z jedné strany. Pro segmentaci dílu byla vytvořena metoda popsaná následujícím algoritmem:

1. Ulož středy všech polygonů a jejich normály
2. Vytvoř nejmenší obálkový kvádr (bounding box) měřeného dílu (Obr. 5-12)

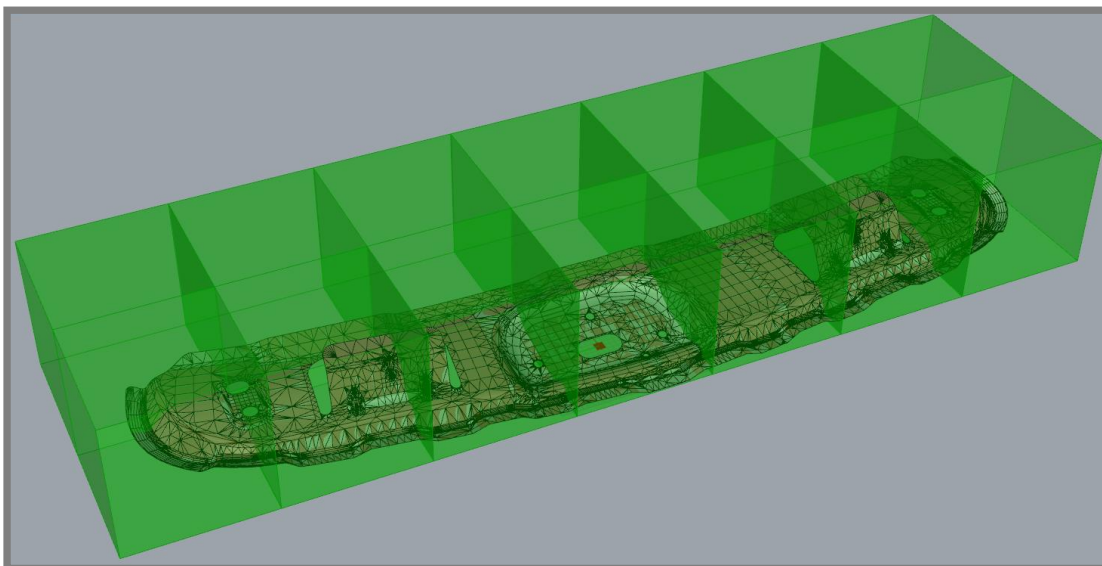
3. Rozděl kvádr na krychle o velikosti nejmenšího rozměru měřicího objemu použité optiky skeneru (Obr. 5-13)
4. Vypočítej průměrnou váženou normálu polygonů v každé krychli. Váhou je plocha jednotlivých polygonů. Normály polygonů v jedné krychli viz Obr. 5-14.
5. Ulož do 1. segmentu všechny body, jejichž normály jsou do 45° elevace (θ) od průměrné vážené normály (Obr. 5-15 a)
6. Do segmentů 2-5 ulož všechny body, jejichž normály mají úhel elevace (θ) od 45° do 135° a azimut (φ) postupně od 0° do 90° , 90° až 180° , atd. (Obr. 5-15 b)
7. Do segmentu 6 ulož body s normálami v úhlu elevace od 135° do 180° (Obr. 5-15 c)
8. Dále nepočítej se segmenty s počtem bodů menším než přednastavená limitní hodnota (degenerované trojúhelníky, špatně orientovaná normála, apod.)



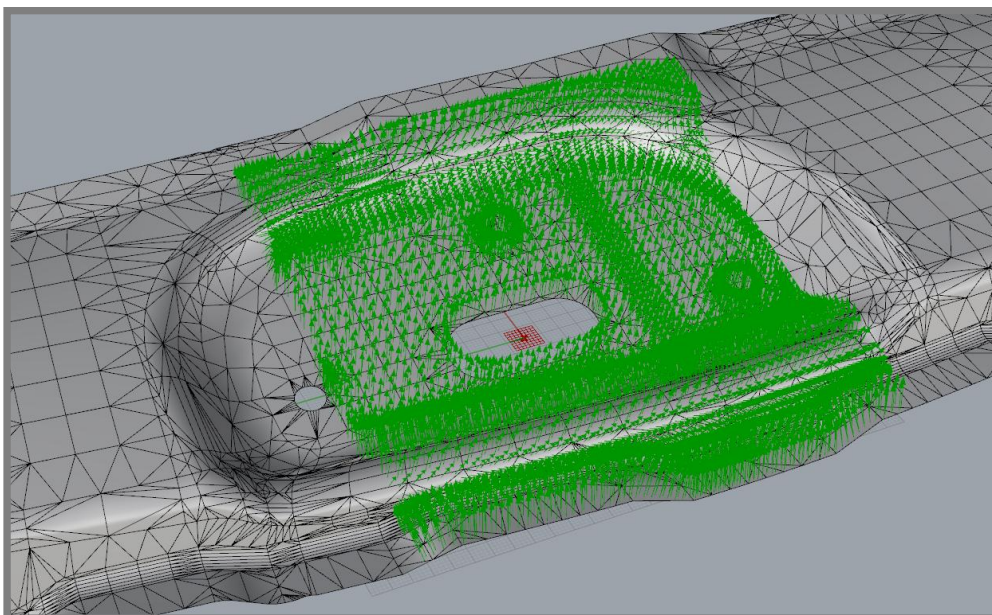
Obr. 5-11 Konvence úhlů elevace a azimutu



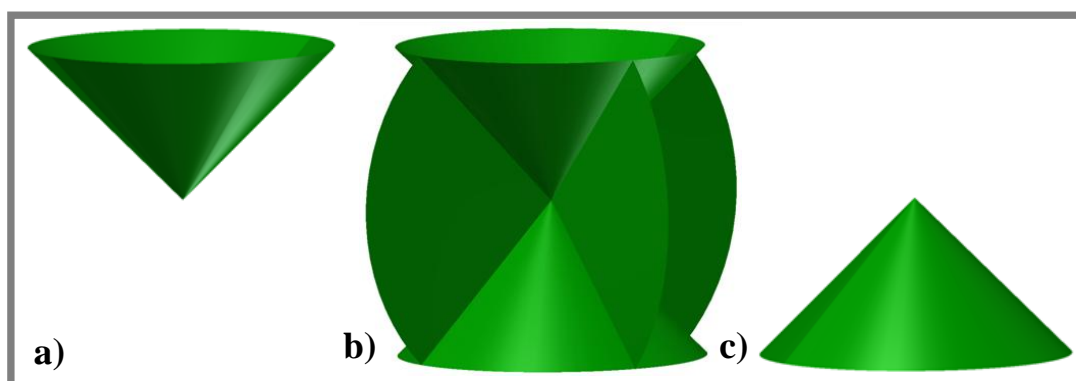
Obr. 5-12 Model měřeného dílu a jeho obálkový kvádr



Obr. 5-13 Obálkový kvádr tělesa rozdělený na krychle podle měřicího objemu skeneru



Obr. 5-14 Normály polygonální sítě v jedné z krychlí



Obr. 5-15 Segmentace podle normál; a) 1. segment; b) 2. - 5. segment; c) 6. segment

Navržený způsob segmentace dílu se do jisté míry shoduje s přístupem použitým v článku [27]. Největší nevýhodou přístupu z [27], jak už bylo zmíněno v kapitole 2.4.1, je absence simulace viditelnosti z daných vygenerovaných pozic. Ta je v popisovaném návrhu realizována, takže tento problém odpadá.

Nevýhoda navržené metody segmentace spočívá v chybějící optimalizaci navržených segmentů. Je možný vznik segmentů obsahujících velmi malý počet bodů a jejich normál. V případě vzniku segmentu s počtem bodů pod limitní hodnotu se pro tento segment pozice nepočítá.

5.2.4 Návrh pozic měření

Vstupem do této části softwaru jsou body dílu (střed polygonů) a jejich normály rozdělené do krychlí podle zvoleného měřicího objemu a dále v těchto krychlích rozdělené do segmentů podle normál polygonů.

K výpočtu pozic měření je využit koncept map viditelnosti a kombinovaných map viditelnosti (tzv. Combined Visibility Map), který je popsán v kapitole 2.4.2. Cílem tohoto kroku je nalézt takové orientace kamer a projektoru vzhledem k danému segmentu, že bude co nejvíce jeho bodů viditelných. Metoda map viditelnosti staví na principu, který je možné popsat následujícím algoritmem:

1. Pro každý bod segmentu (střed polygonu) udělej:
 - 1.1. Vytvoř body na kouli o jednotkovém průměru tak, že střed koule je v daném bodě segmentu a body jednotkové koule budou rozmístěny pravidelně v rozmezí $\theta = \langle 0; \pi \rangle$; $\varphi = \langle 0; 2\pi \rangle$. Krok pro oba úhly zvol 5° .
 - 1.2. Vytvoř vektor z bodu (střed polygonu) postupně skrze všechny body na kouli (viz Obr. 5-16)
 - 1.3. Pokud je vektorový součin vektoru a normály větší než 0,26, ulož hodnotu 0
 - 1.4. Vyšli paprsek ve směru vektoru
 - 1.5. Pokud paprsek protne nějaký polygon na modelu, ulož hodnotu 0
 - 1.6. Pokud paprsek nic neprotne, ulož hodnotu 1
 - 1.7. Ulož hodnoty do dvourozměrného pole

Krok v bodě 1.1 je zvolen na hodnotu 5° z důvodu úspory výpočetního času – výpočet se v každém bodě v tomto případě provádí pro 2 592 paprsků – zároveň je zachována vysoká popisnost. Hodnota použitá v práci [40] je 3° . V případě této práce je však použito větší množství bodů na povrchu tělesa, a proto by měla být tato hodnota dostatečná.

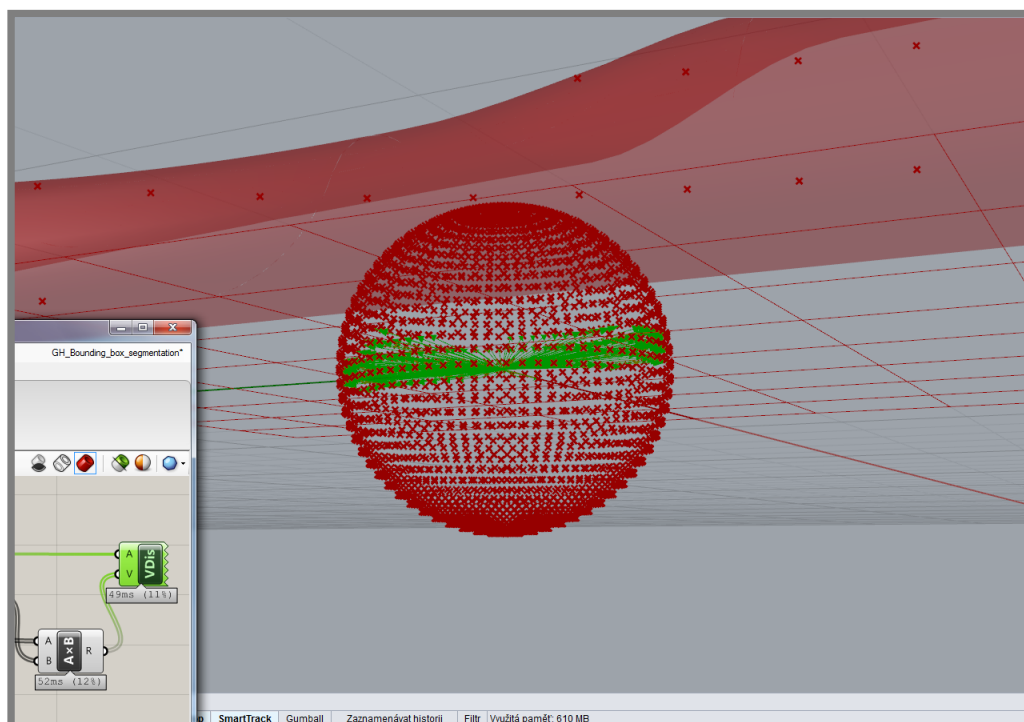
V bodě 1.3 je použita uvedená podmínka, která zrychluje výpočet, protože se následující výpočet průniku paprsků polygonální sítě (mesh) počítá pouze pro 5/12 všech paprsků. Paprsky v úhlech elevace 75° od normály plochy nemá smysl počítat, protože v takových úhlech by se plocha ani nemohla měřit.

Pro bod 1.4 byly testovány 3 různé příkazy, umožňující výpočet průniku paprsku s polygony sítě. Výsledky se liší z důvodu různé implementace a jsou uvedeny hodnoty času pro výpočet 2 592 paprsků vyslaných z jednoho bodu (výpočet testován na počítači s konfigurací uvedenou v kapitole 5.3.1):

Tabulka 9 Výpočet průsečíku paprsku s polygonální sítí

Metoda	Čas [ms]
MeshRay komponent modulu Grasshopper	50
Rhino.Geometry.Intersect.Intersection.MeshRay	250
ghpythonlib.components.MeshXRay	300 000

Pro konečné řešení byla zvolena druhá varianta, která je sice 5x pomalejší, než první, ale tu lze přímo v prostředí Rhinoceros použít jedinež importem modulu *ghpythonlib*, což je třetí varianta v tabulce (Tabulka 9). Její vysoké zpomalení je pravděpodobně způsobeno převody datových struktur. Funkce MeshRay je v navrženém softwaru paralelizovaná, čímž je dosaženo zvýšení rychlosti výpočtu.



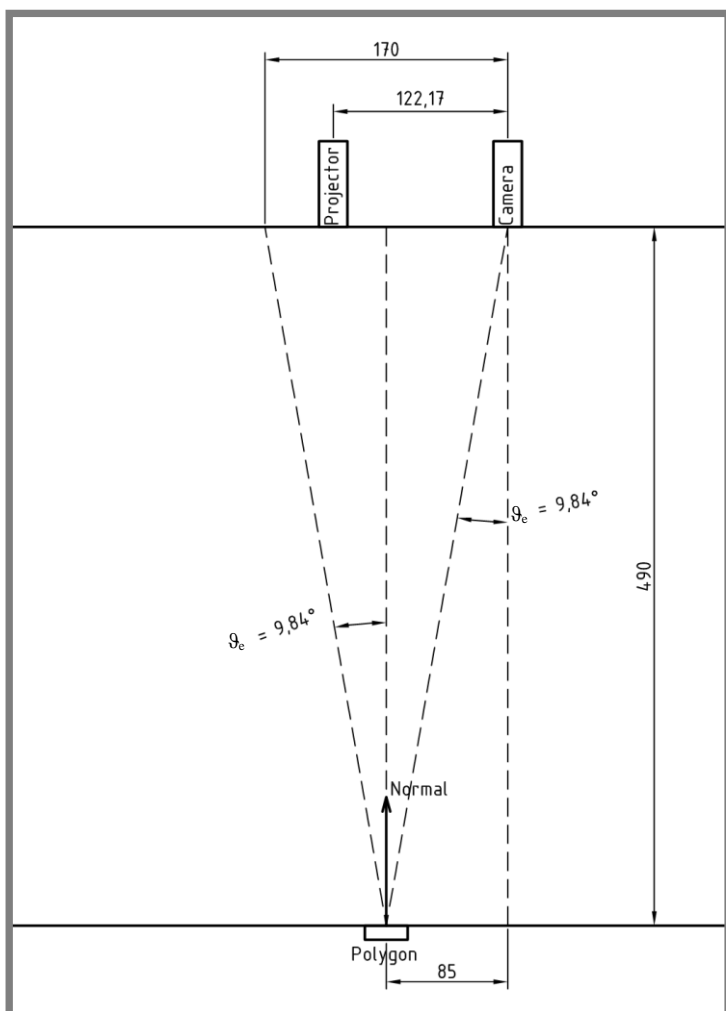
Obr. 5-16 Paprsky vyslané přes body na jednotkové kouli (viditelné jsou pouze paprsky protínající síť)

Jak je patrné v metodice řešení v kapitole 5.2.1, mapa viditelnosti je vypočítána pro všechny polygony dílu na začátku výpočtu. Následně je uložena pro použití v iteračním postupu. V něm následuje využití metody kombinované mapy viditelnosti, která je počítána pro body jednotlivých segmentů a jejíž výpočet probíhá podle následujícího algoritmu:

1. Sečti dvourozměrná pole map viditelnosti pro všechny body segmentu. Tím vznikne dvourozměrné pole kombinované mapy viditelnosti (viz Obr. 5-18)
2. Interpoluj výsledné pole na rozměr $0-180^\circ$ ($0-\pi$) a $0-360^\circ$ ($0-2\pi$) za použití bilineární interpolace

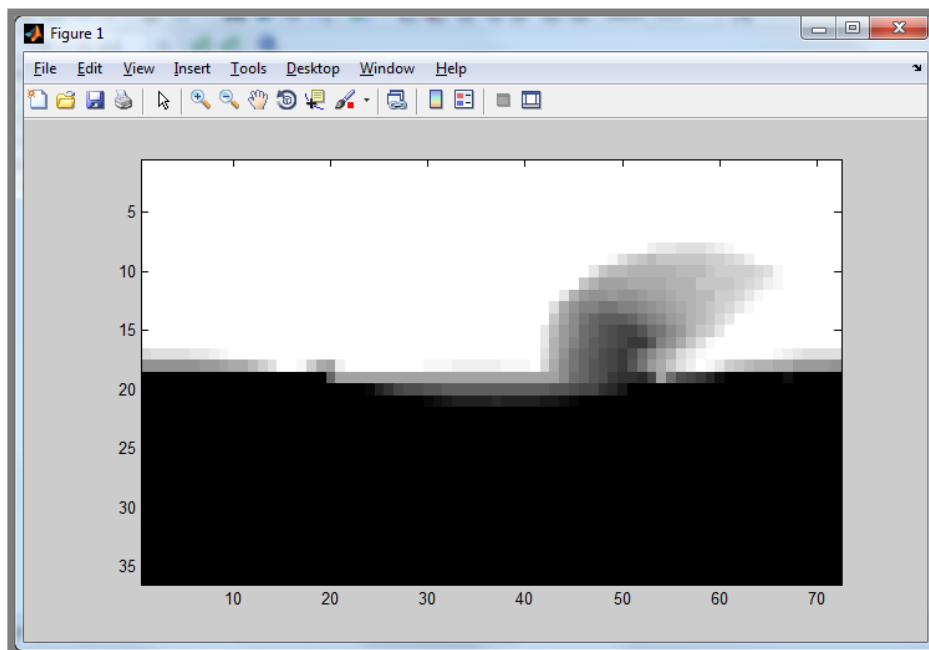
3. Proved' dilataci⁶ výsledného pole o hodnotu x
4. Ulož výsledné pole

Metoda kombinované mapy viditelnosti dává přesnou informaci o viditelnosti plochy v případě, kdy by byla kamera (skener) umístěn v nekonečnu. V případě, kdy se zmenšuje poměr mezi vzdáleností kamery od měřené plochy a jejího zorného pole, snižuje se i přesnost této metody (zmíněno již v kapitole 2.4.2). Rozpětí úhlu, pod kterým jsou jednotlivé body plochy (segmentu) viditelné z konkrétní pozice, se začíná zvětšovat. Z tohoto důvodu je zařazen krok dilatace výsledného pole o hodnotu x . Její hodnota je závislá na použité optice a tedy poměru skenovací vzdálenosti a zorného pole. Z Obr. 5-17 je patrné, že při použití skeneru ATOS Triple Scan a měřicí optiky MV170 bude bod na okraji zorného pole při pozici kamery kolmo k ploše pozorovaný pod úhlem o $9,84^\circ$ jiným než bod uprostřed zorného pole.



Obr. 5-17 Viditelnost bodu na kraji zorného pole a jeho pozorovací úhel

⁶ dilatace je morfologická operace používaná pro úpravu obrazových dat. Dilatace provádí rozšíření oblastí obsažených v těchto datech.



Obr. 5-18 Graficky znázorněná kombinovaná mapa viditelnosti v MATLABu

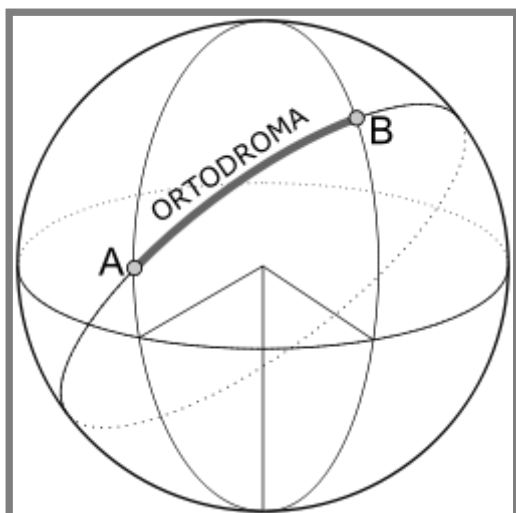
5.2.5 Výpočet možných pozic měření

Na základě kombinované mapy viditelnosti pro každý segment a průměrné vážené normály daného segmentu jsou vypočítány možné pozice skenování. Pro výpočet je použita alternativa k Vincenty algoritmu pro geodetický výpočet vzdálenosti dvou bodů ve sférických souřadnicích. Tento algoritmus je používán pro přesné výpočty uvažující Zemi jako elipsoid. Ve zjednodušené podobě se uvažuje tvar koule. Vychází se z výpočtu ortodromy (nejkratší spojnice dvou bodů na kulové ploše [70]). Výpočet neznámého bodu se řeší následovně [71]:

$$\theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 \cos \delta + \cos \theta_1 \sin \delta \cos \lambda) \quad (21)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \operatorname{atan2}(\sin \lambda \sin \delta \cos \theta_1, \cos \delta - \sin \theta_1 \sin \theta_2) \quad (22)$$

kde δ je úhel mezi dvěma body na kulové ploše, λ je počáteční směrnik, θ_1 a θ_2 jsou úhly elevace a φ_1 a φ_2 jsou úhly azimutu těchto dvou bodů (resp. jejich vektorů ze středu koule). Těmito dvěma body (vektory) jsou průměrná normála segmentu a možná orientace kamery (projektoru).



Obr. 5-19 Ortodroma - vzdálenost dvou bodů na kulové ploše [70]

Při využití známého směru průměrné normály segmentu, dosazením šesti počátečních směrů v rozmezí $(0 - 360)^\circ$ po 60° a úhlu δ v hodnotě 40° (ve výpočtu zvoleno jako vhodný úhel mezi normálou povrchu a kamerou) získáme šest možných směrů první kamery $C1_{\theta i}$ a $C1_{\varphi i}$. Obdobným způsobem pak pro každý směr kamery a úhel δ v hodnotě odpovídající úhlu mezi první a druhou kamerou skeneru získáme šest možných směrů druhé kamery $C2_{\theta i}$ a $C2_{\varphi i}$. Směr projektoru ($P_{\theta i}$ a $P_{\varphi i}$) je již závislý a získáme ho využitím následujících rovnic pro výpočet středového bodu mezi dvěma body ortodromy:

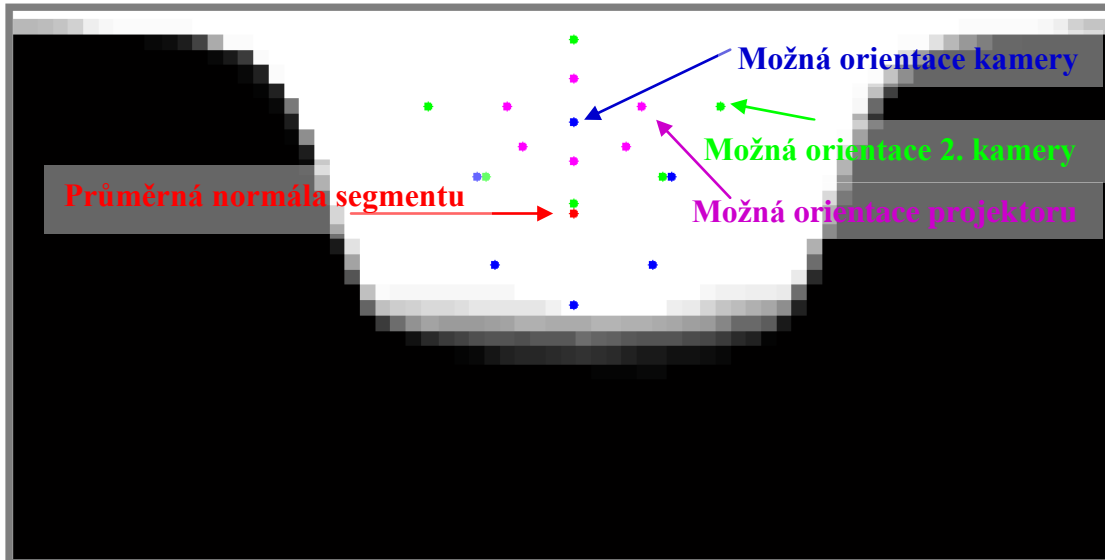
$$B_x = \cos \theta_2 \cos \Delta\varphi \quad (23)$$

$$B_y = \cos \theta_2 \sin \Delta\varphi \quad (24)$$

$$\theta_m = \text{atan2} \left(\sin \theta_1 + \sin \theta_2, \sqrt{(\cos \theta_1 + B_x)^2 + B_y^2} \right) \quad (25)$$

$$\varphi_m = \varphi_1 + \text{atan2} (B_y, \cos \theta_1 + B_x) \quad (26)$$

Výsledek v grafické podobě je na Obr. 5-20. Zobrazena je průměrná normála daného segmentu, šest možných směrů první kamery a pro jeden z těchto směrů možné směry druhé kamery a závislé směry projektoru.



Obr. 5-20 Kombinovaná mapa viditelnosti s možnými orientacemi kamer a projektoru

5.2.6 Způsob hodnocení navržených orientací pro měření

Pro posouzení a výběr nejvhodnější orientace kamer a projektoru pro každý segment byla vyvinuta metrika závislá na následujících koeficientech, pohybujících se v rozsahu hodnot 0-1:

- Koeficient viditelnosti

$$Cf_{vis} = C1_{vis}^{10} \cdot P_{vis}^{10} \cdot C2_{vis}^{10} \quad (27)$$

- data získaná z celkové mapy viditelnosti pro každou orientaci kamery 1 a 2 a projektoru ($C1_{vis}$, $C2_{vis}$, P_{vis}); hodnoty v rozmezí 0-1; 0 – žádný bod segmentu není viditelný, 1 – všechny body segmentu jsou viditelné

- Koeficient shodné elevace kamery a projektoru

$$Cf_{\theta} = \left| \left(\frac{|C1_{\theta} - P_{\theta}|}{\alpha} \right) - 1 \right| \quad (28)$$

- Koeficient, jehož vyšší hodnota zajišťuje shodnou orientaci kamery a projektoru podél úhlu elevace; α – úhel mezi kamerou a projektorem daného skeneru

- Koeficient orientace objektu

$$Cf_{obj_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}} \quad (29)$$

- kde v závislosti na nejdelší straně objektu je:

- x:

$$\theta_{or} = \left| \left(\frac{|C1_{\theta} - P_{\theta}|}{\alpha} \right) - 1 \right| \quad (30)$$

$$\varphi_{or} = (\cos C1_{\varphi})^2 \cdot (\cos P_{\varphi})^2 \quad (31)$$

- y:

$$\theta_{or} = \left| \left(\frac{|C1_\theta - P_\theta|}{\alpha} \right) - 1 \right| \quad (32)$$

$$\varphi_{or} = (\cos C1_\varphi)^2 \cdot (\cos P_\varphi)^2 \quad (33)$$

▪ z:

$$\theta_{or} = (\sin C1_\theta)^2 \cdot (\sin P_\theta)^2 \quad (34)$$

$$\varphi_{or} = \left| \left(\frac{|C1_\varphi - P_\varphi|}{\alpha} \right) - 1 \right| \quad (35)$$

- Koeficient orientace segmentu

$$Cf_{seg_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}} \quad (36)$$

- výpočet hodnot θ_{or} a φ_{or} je shodný s výpočtem výše s tím rozdílem, že se počítá pro nejdelší stranu obábkového kvádrů bodů aktuálního segmentu

- Koeficient orientace druhé kamery

$$C_{2cam} = \left| \left(\frac{|\vartheta_{e2} - \beta_n|}{(\beta_n + 2\alpha)} \right) - 1 \right| \quad (37)$$

- koeficient bude mít nejvyšší hodnotu v případě, kdy bude druhá kamera pod úhlem 40° vůči normále segmentu; ϑ_{e2} – úhel mezi druhou kamerou a normálou segmentu, β_n – ideální úhel mezi kamerou a normálou (40°), α – úhel mezi kamerou a projektorem

Výsledný koeficient, určující vhodnost každé orientace, je vypočítán jako:

$$Cf_{pos} = a \cdot Cf_{vis} + b \cdot Cf_\theta + c \cdot Cf_{obj_or} + d \cdot Cf_{seg_or} + e \cdot C_{2cam} \quad (38)$$

kde a, b, c, d, e jsou váhové koeficienty ovlivňující vliv jednotlivých koeficientů. Váhové koeficienty jsou na základě zkušeností práce se skenerem a na základě testování nastaveny na hodnoty: $a = 5, b = 1, c = 1,5, d = 2, e = 3$.

Vypočítané možné pozice jsou na základě koeficientu Cf_{pos} seřazeny od nejvyšších hodnot. V následujícím iteračním postupu jsou pak tyto pozice v tomto pořadí ověřovány na dostupnost robotem a absenci kolizí s měřeným dílem nebo jinou součástí měřené scény.

V této fázi výpočtu se stále ještě nejedná o konkrétní pozice v prostoru, ale orientace (úhly elevace a azimutu) obou kamer a projektoru. Konkrétní pozice jsou vypočítány až v dalším kroku v závislosti na polygonech segmentu, pro který se počítají.

5.2.7 Kontrola dostupnosti robota

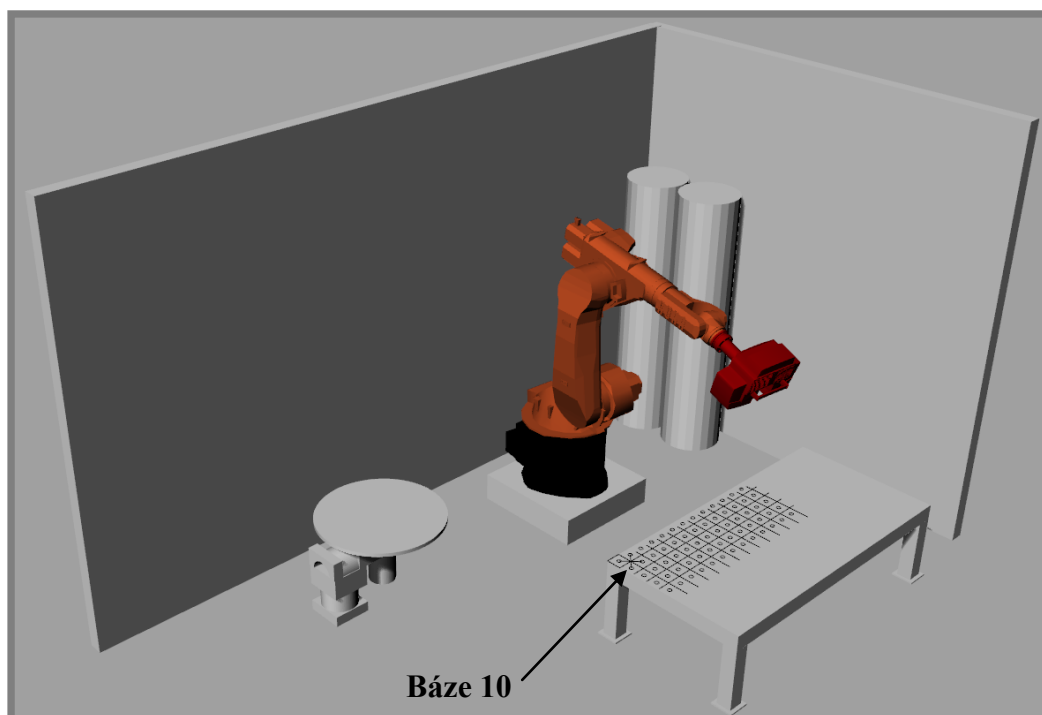
Dalším krokem ve výpočtu je kontrola dostupnosti vypočítaných pozic pro robota. Pro tento krok je využit modul pro Grasshopper, KUKA|prc. Ten má široké možnosti simulace různých typů robotů KUKA. Především je určen pro generování drah

obrábění, poskytuje však i možnost tvorby vlastních obecných obráběcích nástrojů. Toho je využito k tvorbě nástroje v podobě skenovací hlavy.

Využití modelu místnosti

Pro kontrolu kolizí a nastavení báze robota byl využit model místnosti, ve které se nachází průmyslový robot (viz Obr. 5-21). Tento model byl vytvořen pro software KUKA Sim Tech a standardně se využívá pro simulace obráběcích drah vygenerovaných v softwaru Tebis.

Model místnosti je importován v podobě polygonální sítě do softwaru Rhinoceros a následně je v rámci běhu programu přiřazen komponentě „Collision“ určené pro kontrolu kolizí.

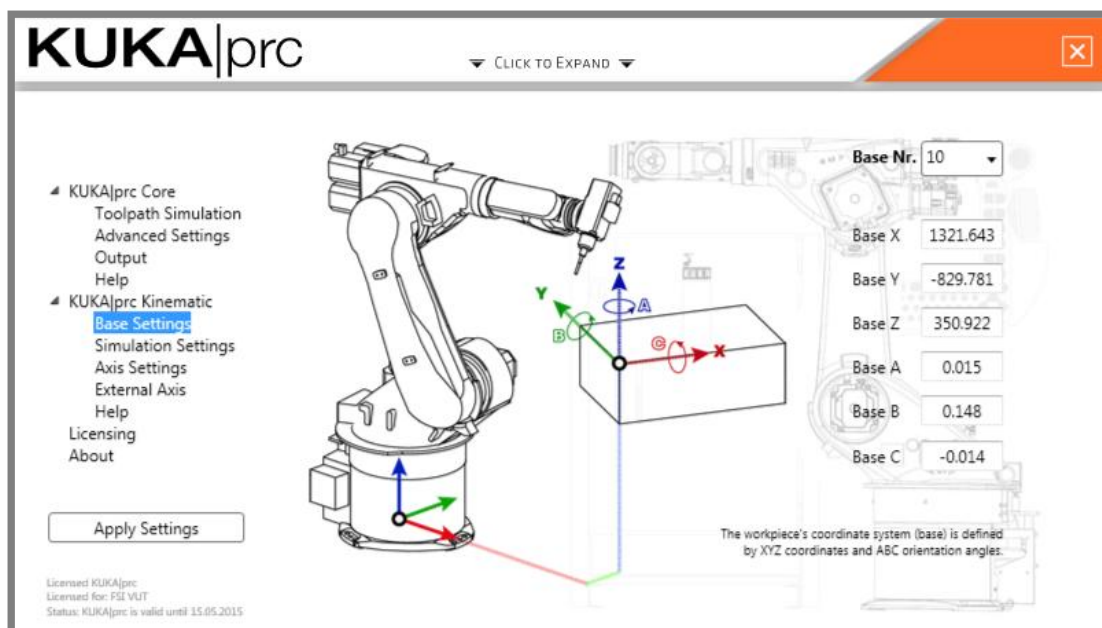


Obr. 5-21 Model vybavení místnosti, ve které probíhá měření s robotem

Báze robota

Pro stanovení souřadného systému, od kterého robot odečítá souřadnice uvedené v kódu pro jeho řízení, se využívá tzv. systém bází. Jak je vidět i na Obr. 5-22, jedná se o tři hodnoty posunutí a tři hodnoty natočení vzhledem k počátku robota. Konkrétní hodnoty použité v mém řešení (a na Obr. 5-22) jsou odvozeny pro bod na obráběcím stole (viz Obr. 5-21) a tato báze byla vytvořena pro potřeby obrábění a pro mé řešení byla v uvedené podobě převzata.

Báze nastavená v programu a tím pádem i ve výsledném kódu pro robota se musí shodovat sází aktuálně nastavenou v robotu.



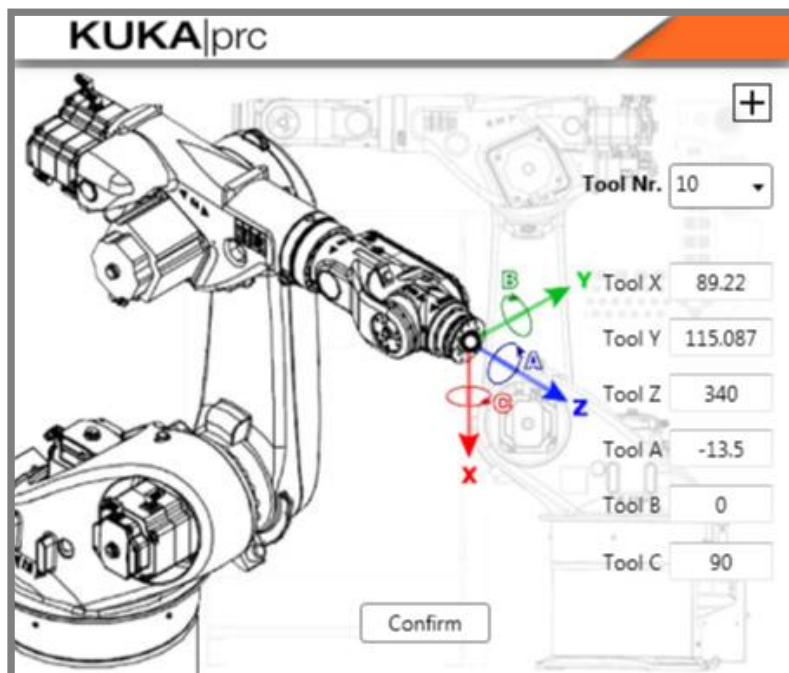
Obr. 5-22 Nastavení báze robota

Vlastní nástroj

Pomocí komponenty Custom tool v prostředí Grasshopperu byly stanoveny hodnoty pro vlastní nástroj – skener ATOS připevněný pomocí držáku vlastní výroby (viz Obr. 5-23). Nástroj je definován pomocí tří souřadnicových hodnot posuvu vůči přírubě robota a tří hodnot natočení ve směru těchto os (viz Obr. 5-24). Tyto hodnoty odpovídají poloze obrazové roviny (čipu) levé kamery, která se využívá v celém dalším výpočtu jako určení polohy a orientace skeneru. Hodnoty vycházejí z rozměrů držáku, CAD modelu použitého skeneru a hodnot vypočítaných v kapitole 5.1.1.



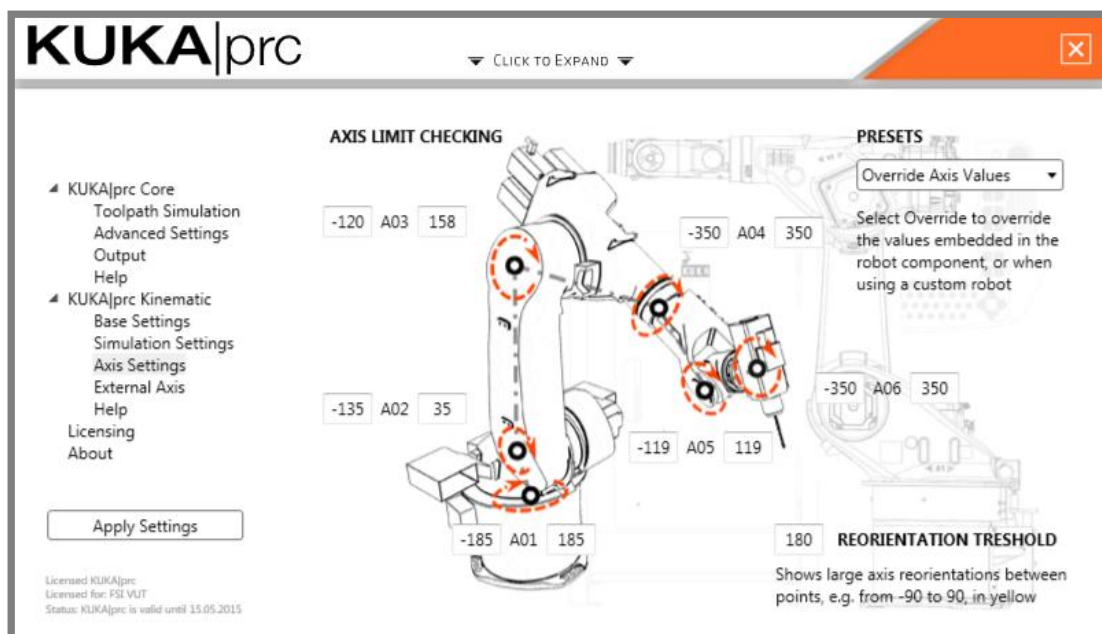
Obr. 5-23 3D skener upevněný pomocí vlastního držáku na robota



Obr. 5-24 Nastavení vlastního nástroje - skener ATOS

Nastavení os robota

Každý robot, v mém případě konkrétně KUKA KR60HA, je definován pomocí Denavit–Hartenbergových (DH) parametrů. Ty stanoví vztah mezi jednotlivými články kinematického řetězce. U robota jsou tedy díky nim popsány vzdálenosti a úhly mezi jednotlivými osami. Toto je však nastaveno pro předdefinované roboty přímo v KUKA|prc modulu. Jsou přednastaveny také rozsahy jednotlivých os, které jsou však nastaveny obecně. Pro robota KUKA KR60HA byly proto nastaveny podle skutečných hodnot rozsahů udávaných v manuálu k tomuto robotu (viz Obr. 5-25). Modul umožňuje zapnout grafické zobrazení, pokud dojde k přetočení některé z os mezi jednotlivými pozicemi o větší než přednastavenou hodnotu, neumožňuje však tuto informaci získat nijak programově.



Obr. 5-25 Rozsahy os robota KUKA KR60HA nastavené v KUKA|prc

Pomocí komponenty GhPython modulu Grasshopper je možné použít komponenty modulu KUKA|prc ve skriptovacím editoru a dále je automatizovat přiřazováním proměnných a čtením hodnot z výstupních proměnných. Toho bylo využito pro:

- *Přiřazení objektů pro kontrolu kolizí* – tyto objekty jsou v softwaru Rhinoceros identifikovány pomocí unikátních ID, pomocí kterých mohou být nalezeny
- *Přiřazení pozic měření* – definováno pomocí souřadného systému v obrazové rovině levé kamery
- *Analýzu natočení os v jednotlivých pozicích* – výstup výpočtu, využito pro následné zobrazení jednotlivých měřicích pozic i s danou konfigurací robota
- *Analýzu kolizí* – výstup výpočtu, využito pro vyhodnocení dané pozice podle postupu popsaného dále

Skutečná pozice a orientace skeneru, pro kterou je ověřována dostupnost robota, je vypočítána následujícím způsobem:

1. Vypočítej bod v prostoru, který je středem všech polygonů daného segmentu
2. Urči pozici a orientaci levé kamery ze známého středu segmentu, vzdálenosti d_t (vzdálenost mezi objektem a obrazem), orientace (elevace a azimut) levé kamery a projektoru

Samotná dostupnost robota a kontrola kolizí je prováděna podle následujícího postupu:

1. Nastav skener do pozice podle orientace s nejvyšším koeficientem $C_{f_{pos}}$ a tento koeficient následně nastav na hodnotu 0
2. Je hodnota kolize větší než 0? ⁷

⁷ Pokud dochází ke kolizi s měřeným dílem nebo jiným objektem ve scéně, je kolize rovna 1. Pokud je některé osa mimo svůj rozsah, je kolize rovna počtu os mimo rozsah.

- a. Nastav skener do takové pozice, že místo v pozici levé kamery je pravá a naopak (skener je orientován „vzhůru nohama“, jinak se však jedná o stejnou pozici)
 - b. Je hodnota kolize větší než 0?
 - i. Nastav skener do pozice podle orientace s nejvyšším koeficientem Cf_{pos} , ten nastav na hodnotu 0 a pokračuj od bodu 2
 - c. Jinak
 - i. Ulož tuto pozici a informaci o přetočení skeneru
3. Jinak
- a. Ulož tuto pozici a informaci o přetočení skeneru

5.2.8 Simulace pozic měření

Po ověření, že je pozice dostupná a nedochází v ní ke kolizi, je následně simulována pro stanovení viditelnosti konkrétních polygonů. Proces simulace se skládá ze čtyř základních kroků:

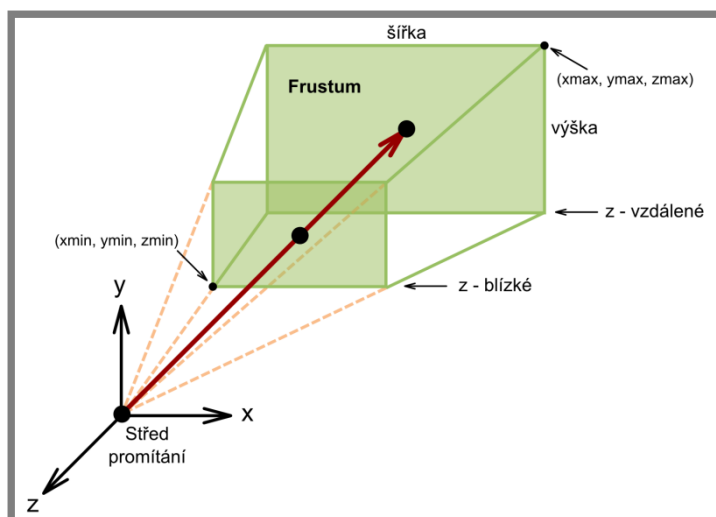
1. *Inkluze polygonů*
2. *Okluze polygonů*
3. *Omezení pozorovacích úhlů*
4. *Viditelnost polygonů*

Podmínky 1 až 3 se ověřují zvlášť pro obě kamery i projektor. Podmínka 4 se ověřuje vždy pro dvojici kamera-projektor. Dvougamerový skener totiž funguje jako dva jednokamerové skenery (ve zjednodušeném pojetí), a proto se výsledná viditelnost po simulaci skládá součtem polygonů viditelných jednou a druhou kamerou.

Podmínky se ověřují pro všechny polygony dílu. To je na jednu stranu poměrně časově náročné, je díky tomu ale možné následně ověřit shodu simulace s reálným měřením. Do každého dalšího kroku výpočtu vstupují jen polygony viditelné v tom předchozím. A hned v prvním kroku se počet ověřovaných polygonů výrazně sníží a tento výpočet je v porovnání s následujícími kroky velmi rychlý a efektivní.

Inkluze polygonů

Inkluzí polygonů je míněno jejich zahrnutí do frusta. Frustum je komolý jehlan znázorňující prostorovou oblast před kamerou/projektorem (viz Obr. 5-26). Pokud se objekt nachází v tomto prostoru, může být vykreslen na monitoru. V mém přístupu je tato oblast definovaná zorným polem a hloubkou ostrosti použité optické soustavy a vychází z parametrů skutečně použitého skeneru, jeho kamer a projektoru (viz Tabulka 10). Frustum je v mém přístupu řešeno pomocí speciálního souřadného systému, kterému se říká Clipping Coordinates (CC) a běžně se používá v počítačové grafice (např. OpenGL). CC mají takovou vlastnost, že po transformaci bodů do CC mají body ležící ve frustu daného pohledu souřadnice v rozsahu $\{-1; 1\}$ ve všech souřadných osách.



Obr. 5-26 Frustum realizované pomocí Clipping Coordinates

Tabulka 10 Parametry nutné pro vytvoření frusta

Veličina	Hodnota [mm]	Popis
d_0	445,164	Vzdálenost objektového ohniska k hlavní rovině objektivu kamery
z_{near}	380,164	Vzdálenost k přední rovině frusta
z_{far}	510,164	Vzdálenost k zadní rovině frusta
f'	41,5	Obrazové ohnisko (z něj vyplývá úhel záběru a další čtyři omezující roviny frusta)

Algoritmus využívající Clipping Coordinates pracuje následujícím způsobem:

1. Vytvoř matici pro převod ze světových (World) souřadnic do souřadnic CC
2. Pro každý bod (střed polygonu):
 - a. Proveď transformaci bodu z World do CC
 - b. Pokud transformované souřadnice bodu leží ve všech osách v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$
 - i. Bod leží ve frustu, ulož je pro další krok
 - c. Jinak
 - i. Bod leží mimo frustum

Okluze polygonů

Simulace okluze, neboli zastínění polygonů, je krokem, v němž se ověřuje, zda před daným polygonem v ose kamery/projektoru neleží jiný polygon, který by zabraňoval jeho viditelnosti. Tento krok je řešen promítáním paprsků skrze středy polygonů a je využita stejná funkce jako v kapitole 5.2.4 pro výpočet map viditelnosti. V tomto případě jsou paprsky vysílány z kamery/projektoru skrze jednotlivé středy polygonů vstupujících do výpočtu z předchozího kroku. Následně je porovnávána vzdálenost, ve které došlo ke střetu s polygonem sítě se vzdáleností ke zkoumanému středu polygonu.

Algoritmus kontroly okluze pracuje následujícím způsobem:

1. Pro každý bod (střed polygonu):
 - a. Vytvoř jednotkový vektor z kamery/projektoru směrem k bodu
 - b. Vytvoř paprsek z kamery/projektoru ve směru vektoru z předchozího kroku
 - c. Pomocí funkce MeshRay vyhodnoť, zda a v jaké vzdálenosti dojde ke kolizi s polygonální sítí měřeného dílu
 - d. Pokud je vzdálenost kolize menší než vzdálenost ke zkoumanému bodu
 - i. Polygon není z dané pozice viditelný
 - e. Jinak
 - i. Polygon je z dané pozice viditelný, ulož jej pro další krok

Omezení pozorovacích úhlů

Před krokem výpočtu viditelnosti pomocí osvětlovacího modelu je zařazen krok omezující viditelnost polygonů z hlediska pozorovací úhlů. Tím jsou pro další výpočet odebrány polygony, jejichž normála svírá se směrem kamery/projektoru úhel větší než povolenou limitní hodnotu. Ta je nastavena následovně:

- Projektor: 85°
- Kameru: 75°

Hodnota pro projektor vychází ze skutečnosti, že pro projektor umožňuje měřenou plochu osvětlit téměř až do 90° . Z praktického hlediska je tato hodnota snížena. Tabulka 5 udává hodnoty pro kameru s naměřeným rozsahem hodnot šedé v rozsahu úhlů ($0 - 80^\circ$). Při úhlu 80° (vůči projektoru) a expozičním času 512 ms je hodnota šedé 29. Hraniční hodnota pro naskenování bodů je stanovena na 30. Při úhlu kamery vůči projektoru $13,5^\circ$ je tedy hodnota 75° nastavená s jistou rezervou.

V kroku omezení pozorovacích úhlů jsou odstraněny i polygony, jejichž normála svírá se směrem kamery/projektoru úhel větší než 90° . Tyto polygony i polygony s úhlem větším než limitním by v následujícím kroku velmi negativním způsobem ovlivňovaly a znehodnocovaly výpočet výsledného expozičního času, který se použije pro danou pozici měření.

Viditelnost polygonů (z osvětlovacího modelu)

Dalším krokem simulace je ověření viditelnosti polygonů využitím osvětlovacího modelu dle Nayara [61]. Jeho aplikace na vizuální inspekční úlohu je popsána v článku [31] a z tohoto článku také vychází aplikace pro mé řešení. Článek je stručně rozebrán v kapitole 2.8.1.

Nayarův model se skládá ze tří složek odlesků: difuzního, lesklého laloku a lesklého hrotu a může být popsán pomocí následující rovnice:

$$R = \rho(\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r) \quad (39)$$

Tento model byl zvolen, protože dobrým způsobem modeluje nelambertovské povrchy, které však zároveň nemají čistě lesklý odraz s výraznou špicí. Tomu materiál plechových dílů plně odpovídá.

Osvětlovací model je implementován takovým způsobem, že nejprve počítá ideální expoziční čas pro polygony daného segmentu a následně počítá viditelnost jednotlivých polygonů podle jejich výsledné hodnoty šedé, kterou by měly v pořizovaném obraze. Pokud je tato hodnota příliš nízká, polygon má nízký jas a promítaný vzor na něm nemůže být dekodován. Pokud je naopak tato hodnota příliš

vysoká, polygon má pro dekodování příliš vysoký jas (je přesvětlený vlivem odrazu světla).

Hodnoty parametrů modelu (pro materiál dílu použitého pro testovací měření) byly vypočteny v kapitole 5.1.2. Ideální hodnoty šedé a její limity, při kterých se očekává naskenování, byly vypočteny v kapitole 5.1.3. Všechny tyto parametry jsou v následující tabulce:

Tabulka 11 Parametry osvětlovacího modelu použité ve výpočtu expozičního času a hodnoty šedé

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
k_1	99	-	konstanta (bližší informace viz Tabulka 6)
σ_1	11,63	-	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
σ_2	135,59	-	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)
m_1	13	-	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
m_2	164	-	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)
G_{ideal}	74	-	ideální hodnota šedé
G_{min}	29	-	minimální hodnota šedé pro dekodování
G_{max}	130	-	maximální hodnota šedé pro dekodování
G_{pol}	dle polygonu	-	hodnota šedé daného polygonu při expozičním čase t_{pol}
d_{pol}	dle polygonu	mm	vzdálenost mezi polygonem a zdrojem světla
ϑ_i	dle polygonu	°	úhel mezi zdrojem světla a normálou povrchu
ϑ_r	dle polygonu	°	úhel mezi kamerou a odraženým paprskem
t_{pol}	dle polygonu	s	expoziční čas pro daný polygon při ideální hodnotě šedé
t_{avg}	dle polygonů	s	průměrný expoziční čas použitý pro ověření viditelnosti (a pro skenování) v dané pozici

Výpočet viditelnosti polygonů poté probíhá podle následujícího postupu:

1. Vypočítej expoziční čas pro každý ze zbývajících nenaskenovaných polygonů segmentu (z ideální hodnoty šedé) podle rovnice:

$$t_{pol} = \frac{(G_{ideal} \cdot d_{pol}^2)}{k_1(\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)} \quad (40)$$

2. Vypočítej průměrný expoziční čas pro tyto polygony: t_{avg}
3. Vypočítej hodnotu šedé pro všechny polygony vstupující do výpočtu z předchozího kroku simulace (omezení pozorovacích úhlů) dle rovnice:

$$G_{pol} = \frac{k_1 \cdot t_{avg} \cdot (\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)}{d_{pol}^2} \quad (41)$$

4. Polygon je viditelný, jestliže jeho výsledná hodnota šedé je v rozmezí minimální a maximální hodnoty, která umožňuje dekodování vzoru, tedy:

$$G_{min} < G_{pol} < G_{max} \quad (42)$$

Výstupem tohoto kroku a tedy i celé simulace je seznam polygonů, které jsou v dané pozici viditelné. Zároveň je výstupem expoziční čas, který se použije pro skenování v dané pozici.

5.2.9 Hledání nejkratší cesty robota

Hledání nejkratší cesty (propojení známých pozic, mezi nimiž jsou známé vzdálenosti) je velmi známý problém a řeší se jako „Problém obchodního cestujícího“. V oblasti automatického skenování řeší tuto problematiku například článek [72]. V této práci je použit aproximační řešič, který nachází suboptimální řešení a využívá hladový algoritmus (s polynomiální složitostí) s následnou optimalizací [73]:

1. Na začátku náleží každý vrchol své vlastní cestě. Každá cesta má délku 1.
2. Hledej dvě nejbližší rozpojené cesty a spoj je.
3. Opakuj, dokud nezůstane minimálně dvě cesty.
4. Pokus se body přeuspořádat tak, aby se řešení zlepšilo

Tento řešič byl pro potřeby práce upraven tak, aby zohledňoval nejen vzdálenosti mezi jednotlivými pozicemi, ale také prostorovou orientaci skeneru a tím také konfiguraci robota. K tomu se využívá informace o natočení obrazové roviny levé kamery. Díky tomuto rozšíření je zohledněno, jak moc se bude robot otáčet mezi jednotlivými pozicemi. Cílem je dosáhnout co nejmenšího přetáčení skenovací hlavy na robotovi a tím i velkých změn v konfiguraci robota.

Samotný výpočet výsledných vzdáleností mezi jednotlivými pozicemi je sestaven ze tří dílčích parametrů:

1. Skutečná euklidovská vzdálenost mezi body (pozice levé kamery) v prostoru (na Obr. 5-27 červené čtverečky symbolizující obrazové roviny kamery)
2. Úhel mezi normálami rovin (osa z), definujících orientaci levé kamery (viz Obr. 5-28)
3. Úhel mezi osami x těchto rovin (viz Obr. 5-28)

Výsledná vzdálenost mezi každými dvěma pozicemi je pak sestavena podle rovnice:

$$dist = dist_e \cdot angle_z \cdot angle_x \quad (43)$$

kde jednotliví činitelé odpovídají bodům 1-3 výše a jsou vypočítány jako:

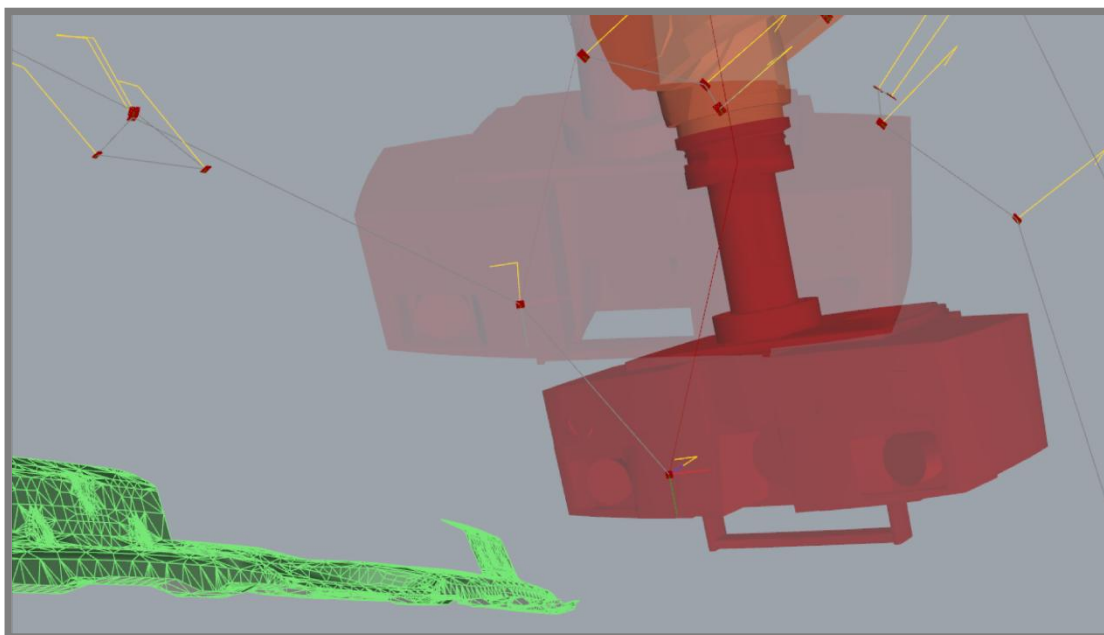
$$dist_e = \sqrt{(p1_x - p2_x)^2 + (p1_y - p2_y)^2 + (p1_z - p2_z)^2} \quad (44)$$

$$angle_z = \frac{\cos^{-1}(pln1_z \cdot pln2_z)}{coef_d} + 1 \quad (45)$$

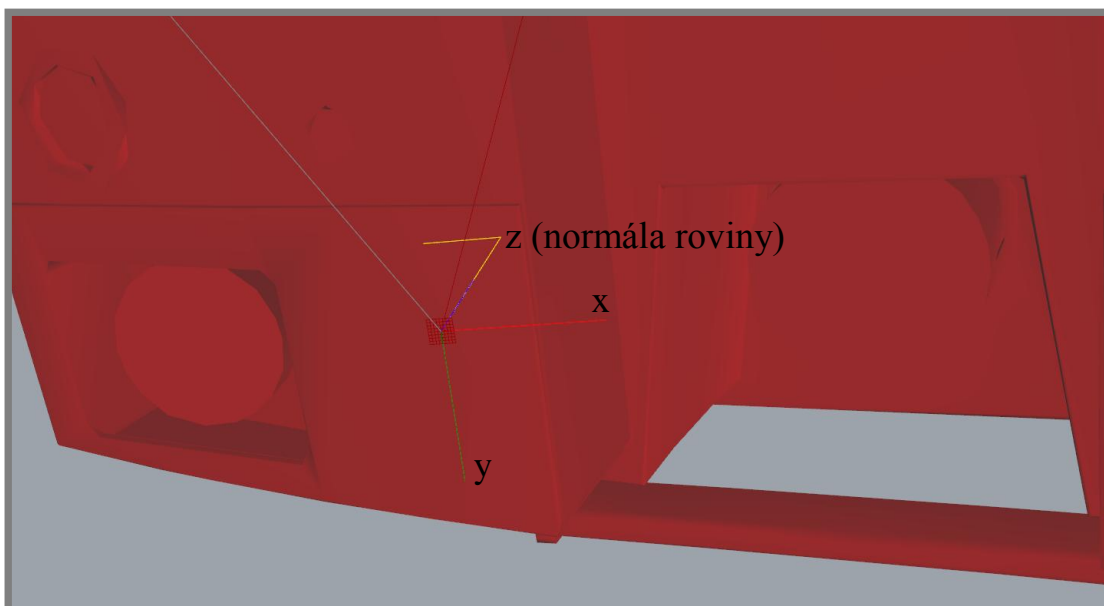
$$angle_x = \frac{\cos^{-1}(pln1_x \cdot pln2_x)}{coef_d} + 1 \quad (46)$$

kde $p1_x, p1_y, p1_z, p2_x, p2_y, p2_z$ jsou souřadnice počátků rovin určujících danou pozici, $pln1_z, pln2_z, pln1_x, pln2_x$ jsou jednotkové vektory určující směr os x a

z dvojice rovin a je počítán jejich vektorový součin a $coef_d$ je koeficient stanovující vliv rozdílu úhlů na celkovou vzdálenost. Experimentálně byl stanoven na hodnotu 2.



Obr. 5-27 Znáznornění přesunu mezi dvěma pozicemi po výpočtu nejkratší cesty.



Obr. 5-28 Souřadný systém levé kamery se znázorněnými osami.

5.2.10 Generování kódu pro řízení robota

Posledním krokem v navrženém softwaru je vygenerování souboru s kódem určeným k řízení robota pro pohyb mezi jednotlivými pozicemi měření. Jedná se o standardní SRC kód, který se používá pro řízení robotů KUKA.

V případě využití modulu KUKA|prc se výsledný kód generuje po načtení vypočítaných pozic měření v pořadí daném výpočtem nejkratší cesty a po virtuálním průchodu těmito pozicemi. Výsledný kód obsahuje informace o:

- použitém nástroji (Tool 10 – ATOS)
- bázi (Base 10 – Table)
- rychlostech a zrychleních posuvů
- výchozí a koncové pozici
- jednotlivých pozicích dráhy robota a druhu pohybu (PTP = Point-to-point)

Ukázka vygenerovaného kódu pro měření testovacího dílu je na Obr. 5-29.

```
28 PDAT_ACT = {VEL 100,ACC 100,APO_DIST 100}
29 FDAT_ACT = {TOOL_NO 10,BASE_NO 10,IPO_FRAME #BASE}
30 BAS (#PTP_PARAMS,100)
31 ;ENDFOLD
32 PTP {E6POS: X -102.532, Y 411.857, Z 688.915, A -18.000, B 47.000, C 45.057, E1
    ↳ 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
33 PTP {E6POS: X -102.532, Y 411.857, Z 688.915, A -18.000, B 47.000, C 45.057, E1
    ↳ 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
34 PTP {E6POS: X -83.272, Y 351.198, Z 718.010, A -9.000, B 53.000, C 71.422, E1 0.
    ↳ 000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
```

Obr. 5-29 Ukázka SRC souboru s kódem pro řízení robota

5.3 Experimentální ověření navržené metodiky

Cílem této kapitoly je popsat podmínky experimentů a samotné experimenty, které byly provedeny za účelem ověření navržené metodiky realizované představeným softwarem.

Ve shodě s cíli práce bylo provedeno:

- Zhodnocení přínosu navrženého řešení v porovnání s ruční přípravou pozic
 - Počet pozic potřebných pro kompletní naskenování dílu
 - Čas potřebný k přípravě pozic
 - Vliv hustoty sítě na počet vygenerovaných pozic
 - Komplettnost naskenování daného dílu
- Zhodnocení shody simulace skenování s realitou
 - Shoda simulovaných záběrů se skutečnými záběry skeneru
 - Shoda plochy pokrytí v simulovaných a skutečných záběrech
 - Úroveň zaznamenání polygonů segmentu, pro nějž je pozice generována
 - Závislost shody simulace s realitou na použité síti (z CAD vs. ze skenu fyzického dílu; různá hustota polygonální sítě)
- Zhodnocení vlivu osvětlovacího modelu
 - Vliv použitého osvětlovacího modelu při aplikaci na díl s materiálem s odlišnými vizuálními vlastnostmi

5.3.1 Měřicí aparatura

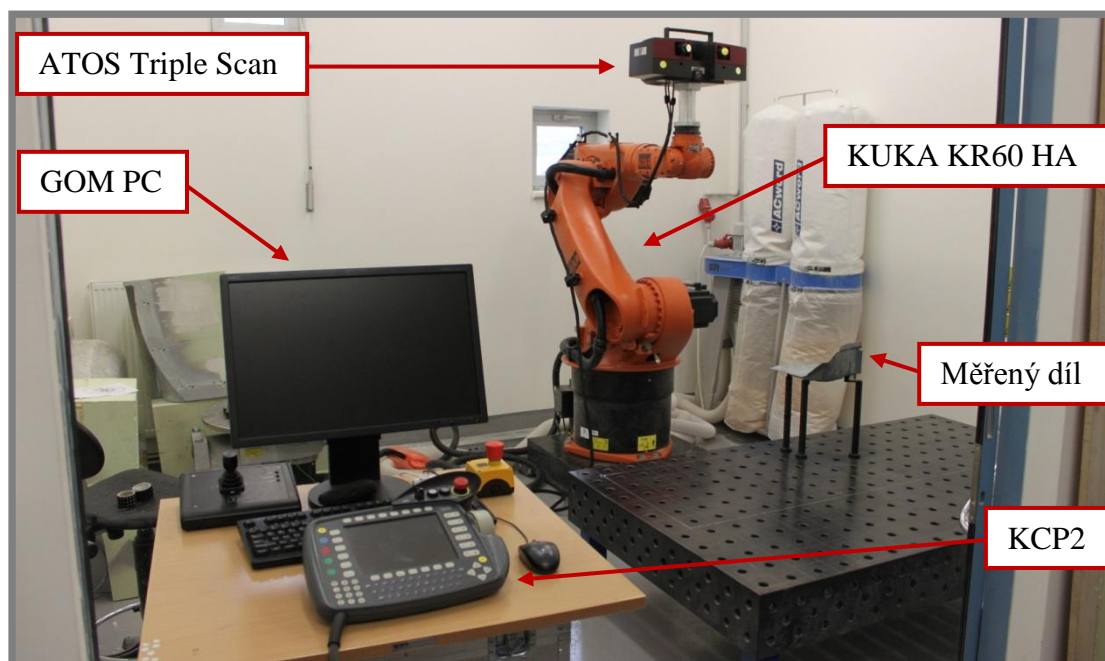
Výpočet probíhal v navrženém softwaru, který funguje jako plug-in pro software Rhinoceros 5. Výpočet byl prováděn na PC s těmito parametry:

- **Procesor:** Inter Core i5 3,2 GHz (4 jádra)
- **Paměť:** 8 GB
- **Grafická karta:** NVIDIA GeForce GTX 550 Ti
- **Systém:** Windows 7, 64-bit

Všechna experimentální měření byla provedena v laboratoři D5/121 (viz Obr. 5-30) s tímto vybavením:

- **Průmyslový robot:** KUKA KR60HA
- **3D skener:** ATOS Triple Scan
- **PC:** GOM PC pro ovládání skeneru
- **Měřicí objem:** MV170 (parametry viz Obr. 5-2)

Pokud není uvedeno jinak, ostatní parametry měření vycházejí z předchozích kapitol metodického přístupu k řešení.



Obr. 5-30 Laboratoř D5/121 a vybavení pro skenování s robotem

5.3.2 Měření vzorky a použité modely

Umístění fyzického dílu

Podmínkou pro to, aby odpovídala vzájemná pozice měřeného dílu a pozic, ze kterých je měřený, je korektní ustavení fyzického měřeného dílu. Toto ustavení je v případě dvou plechových dílů určených pro testování realizováno pomocí přípravků vyrobených technologií 3D tisku. Přípravky jsou umístěny ve sloupcích ustavených do přesných děr na obráběcím stole (viz Obr. 5-32 a Obr. 5-34). Uchycení plechových dílů pomocí těchto přípravků je znázorněno na Obr. 5-31 a Obr. 5-33.

Přesnost tohoto ustavení je závislá na přesnosti skutečné pozice stolu pro obrábění v porovnání s modelem, přesnosti ustavení sloupku ve stole a přesnosti přípravků pro usazení plechového dílu. V případě stolu („Báze robota“ viz kapitola 5.2.7) byly zjištěny následující odchylky:

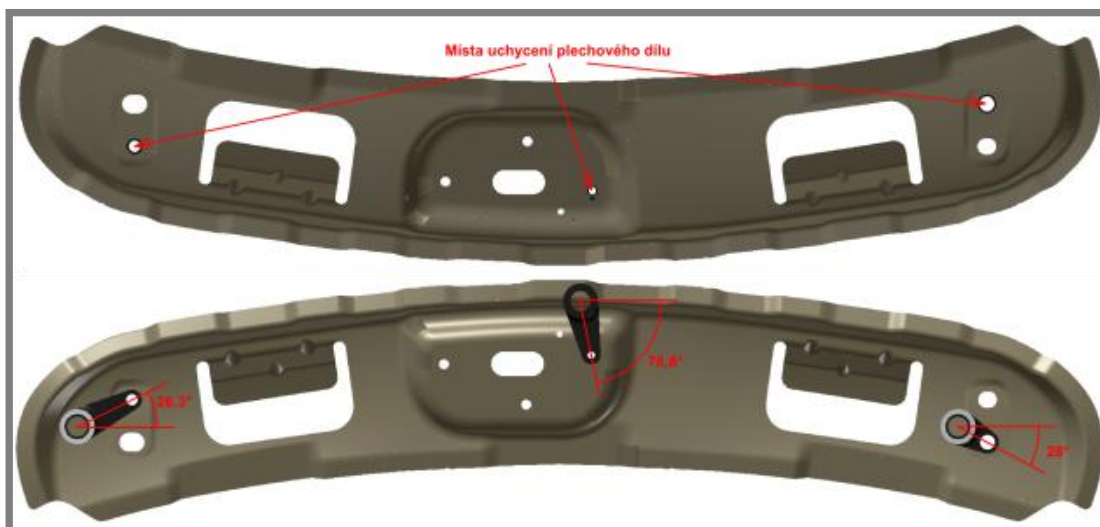
Tabulka 12 Porovnání zarovnání skutečné báze robota s modelem

Směr	Báze – robot [mm]	Báze – model [mm]	Rozdíl [mm]
X	1321,643	1320,515	1,128
Y	-829,781	-830,214	0,433
Z	350,922	354,131	-3,209

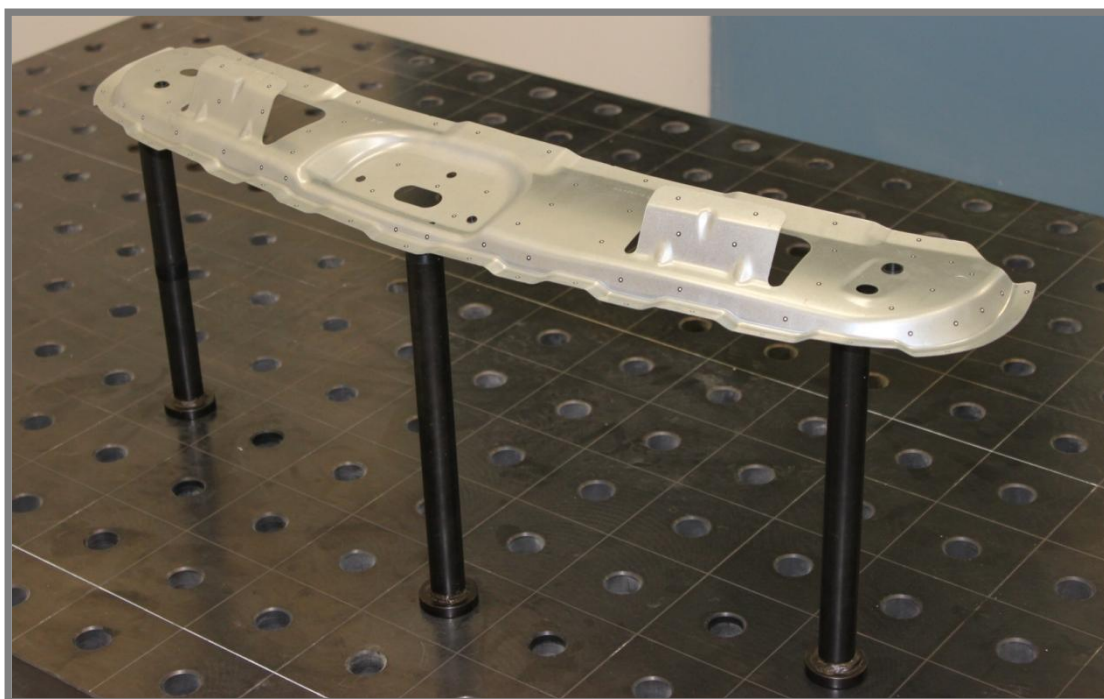
Přesnost umístění sloupků a výroby přípravků by se měla pohybovat v desetinách milimetru. Nejvíce tedy přesnost ustavení dílu ovlivňuje rozdíl mezi bází robota a bází na modelu a největší odchylka i v případě započítání chyby způsobené sloupky a přípravky, je ve směru osy Z.

Do nepřesnosti ustavení vstupuje ještě nepřesnost výroby měřeného dílu. Způsob ověření tohoto vlivu je popsán dále v této kapitole.

Plech1

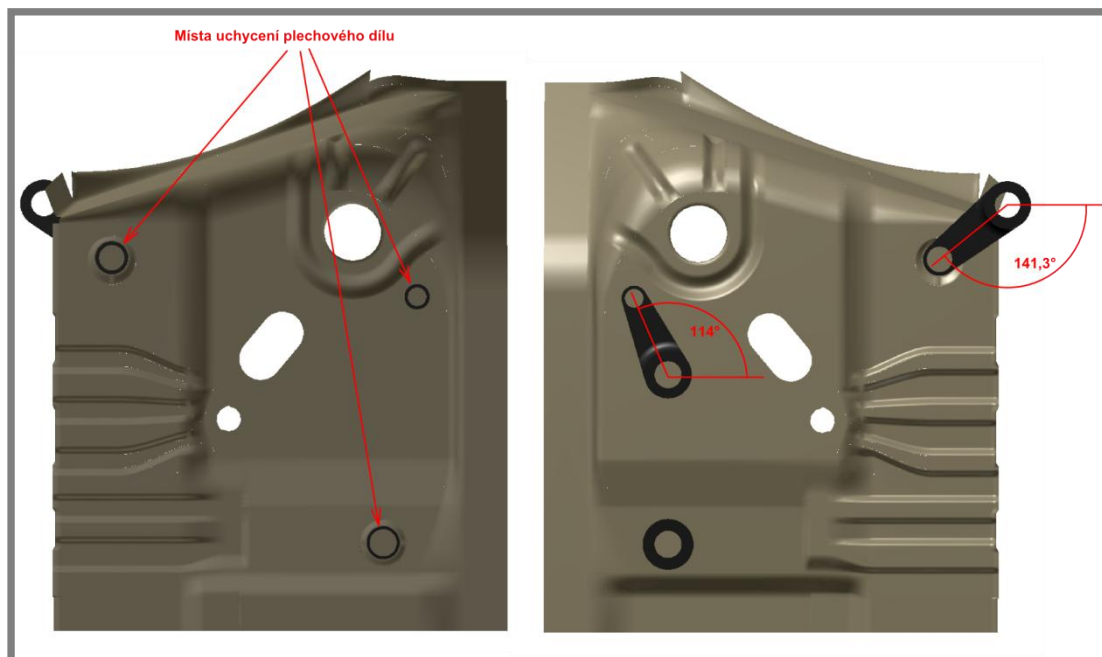


Obr. 5-31 Místa uchycení plechového dílu (Plech1) a podoba přípravků pro jeho uchycení

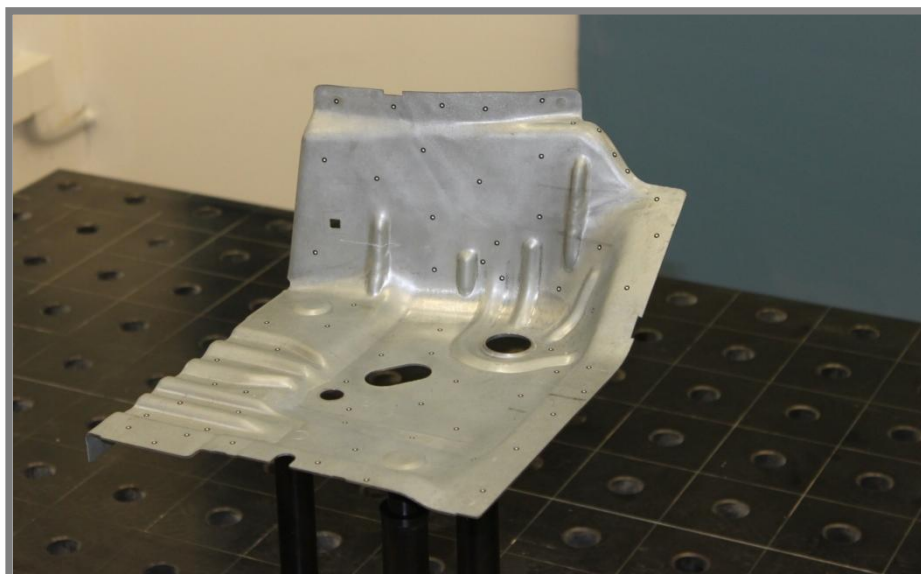


Obr. 5-32 Umístění plechového dílu (Plech1) na stole pro obrábění

Plech2

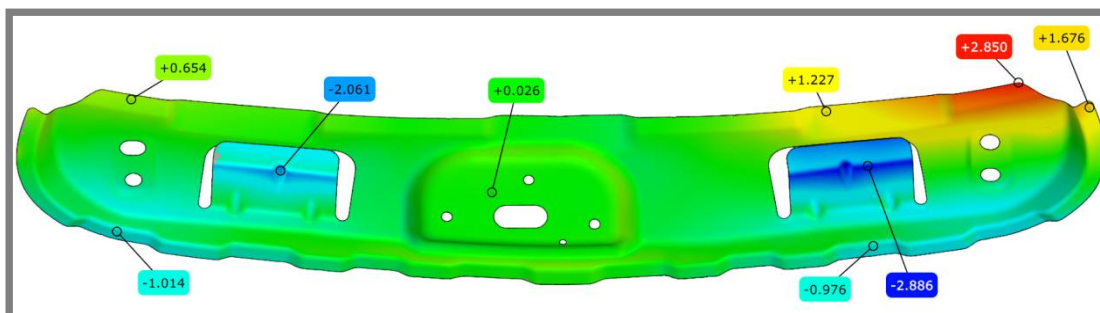


Obr. 5-33 Místa uchycení plechového dílu (Plech2) a podoba přípravků pro jeho uchycení



Obr. 5-34 Umístění plechového dílu (Plech2) na stole pro obrábění

U dílu Plech1 bylo provedeno jeho skenování na základě dat vypočítaných pro polygonální síť získanou z CAD modelu a také polygonální síť získanou ze skenování fyzického dílu. Protože se tato data mohou lišit a cílem bylo v dalších krocích ověřit, jak velký vliv má použití takto různých dat na generování pozic měření, bylo provedeno jejich porovnání na vzájemné odchylky. Výsledek porovnání je na Obr. 5-35. Z výsledků porovnání vyplývá, že odchylky těchto dvou sítí jsou v rozmezí od -2,9 do 2,9 mm při zarovnání na otvory ve střední části dílu.



Obr. 5-35 Srovnání CAD modelu (Plech1) a naskenovaného fyzického dílu

Modely použitých plechových dílů

K realizaci porovnání, uvedených na začátku této kapitoly, byla provedena měření s následujícím nastavením polygonálních sítí modelů plechových dílů:

Tabulka 13 Modely použitých plechových dílů

Měřený díl a původ dat	Počet polygonů	Identifikace modelu
Plech1		
CAD model	9477	P1_CAD_10000
CAD model	29910	P1_CAD_30000
Skenovaný díl	10022	P1_SKEN_10000
Skenovaný díl	29884	P1_SKEN_30000
Plech2		
Skenovaný díl ⁸	8800	P2_SKEN_10000
Skenovaný díl	29169	P2_SKEN_30000

5.3.3 Návrh hodnocení navržené metodiky v porovnání s ruční přípravou pozic

Cílem tohoto kroku bylo ověřit navržené řešení v porovnání s ruční přípravou pozic skenování na robotickém pracovišti. Ruční příprava pozic zahrnuje uvedení robota do vhodné pozice skenování a uložení této pozice. K ručnímu určení pozic byl využit ovladač robota KCP2 (viz Obr. 5-36) a různé metody pohybu robota – *6D myš*, *pohyb ve WORLD souřadnicích*, *pohyb v jednotlivých osách robota*. Po uložení všech pozic skenování je na závěr nutné robotem projít všechny připravené pozice, aby bylo zajištěno, že nedojde ke kolizi při přesunu mezi pozicemi a k zamotání kabelů vedoucích ke skeneru.

⁸ K dílu Plech2 byl k dispozici CAD model, který však neobsahoval některé prolisy a byl tak pro generování pozic nepoužitelný.



Obr. 5-36 Kuka Control Panel (KCP2)

V případě automatizovaného generování pozic je po výpočtu provedeno ověření bezkolizního přesunu mezi pozicemi (absence kolizí v samotných pozicích je ověřena v rámci výpočtu) a kontrola, že nedojde k zamotání kabelů.

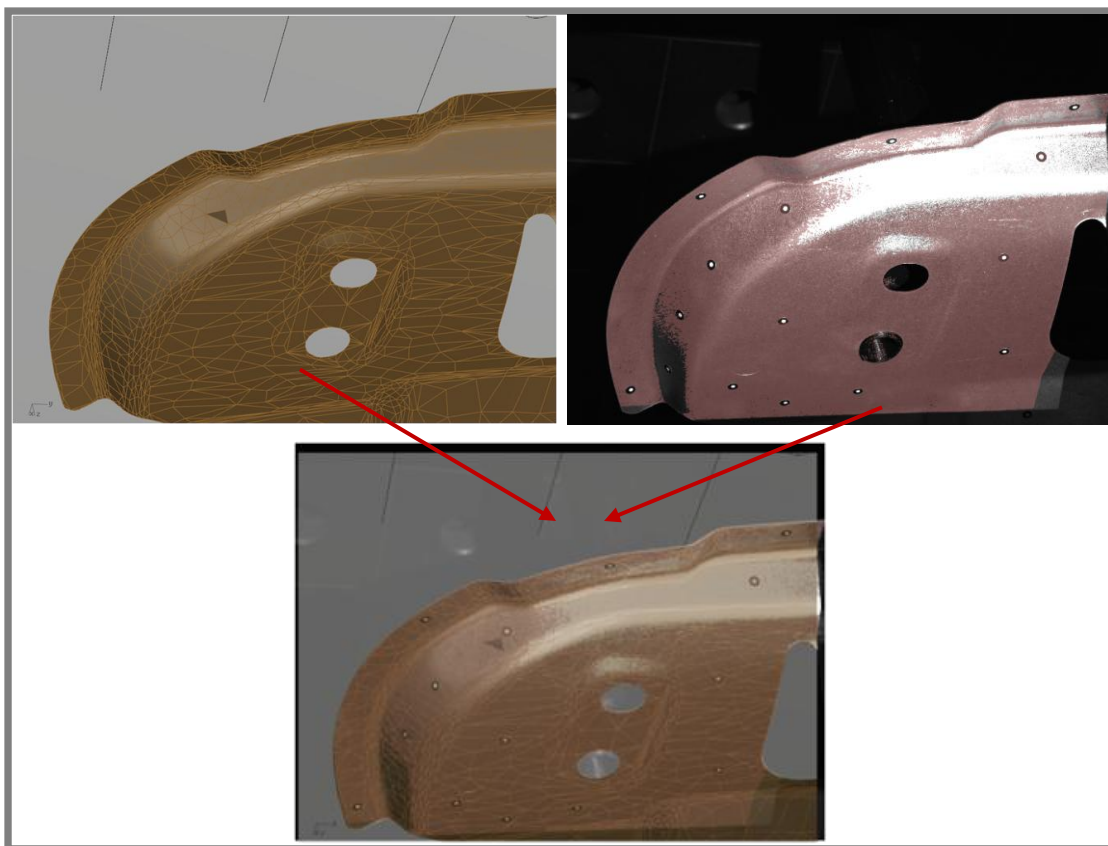
Pro porovnání navržené metodiky byly hodnoceny následující parametry:

- čas potřebný ke generování pozic (v porovnání s časem ruční přípravy)
- počet vygenerovaných pozic měření (v porovnání s počtem pozic připravených ručním způsobem)
- kompletnost naskenovaných dat po měření dle vygenerovaných pozic
- vliv hustoty sítě na počet vygenerovaných pozic a čas výpočtu

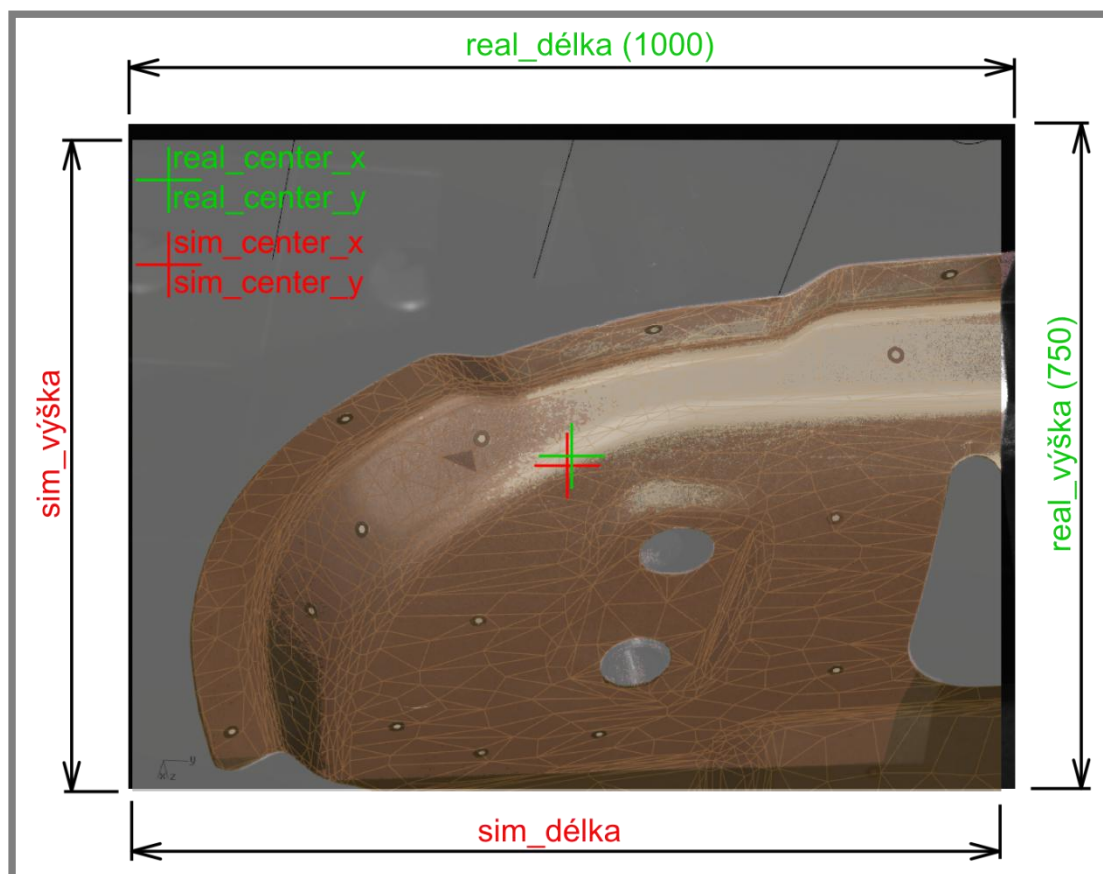
5.3.4 Návrh hodnocení shody simulovaných a reálných pozic měření

Cílem tohoto hodnocení bylo porovnat shodu simulovaných a reálných skenovacích pozic. Shoda simulovaných a reálných pozic byla vyhodnocena na základě simulovaných a reálných snímků kamer. Simulované snímky byly získány v průběhu výpočtu pozic, konkrétně při výpočtu frusta v procesu simulace pozic pro výpočet inkluze polygonů. Reálné snímky byly získány z kamer skeneru. Míra shody těchto snímků nevypovídá přímo o shodě pozic měření, ale je jediným měřítkem, které lze při měření získat a které o této shodě zásadní měrou vypovídá. Navíc je shoda mezi simulovaným a reálným snímkem zásadní pro správné stanovení polygonů, které se v dané pozici naskenují. Cílem bylo zároveň odhalit, čím jsou případné odchylky u těchto pohledů způsobeny.

Porovnání snímků probíhalo ve vektorovém grafickém softwaru Inkscape. Bylo provedeno ručním sesazením dvojic snímků (simulovaný a reálný) takovým způsobem, že reálný snímek měl vždy původní velikost (1000 x 750) px a simulovaný byl zmenšen a vystředěn tak, aby poloha a velikost dílu v tomto snímku souhlasila s polohou a velikostí v reálném snímku (viz Obr. 5-37). Následně byly odečteny výsledné rozměry simulovaného snímku a pozice středů obou snímků (viz Obr. 5-38).



Obr. 5-37 Porovnání smímků (P1_SKEN_10000, pozice 0, levá kamera)



Obr. 5-38 Porovnání polohy středů a velikostí reálného a simulovaného snímku

Po sesazení dvojic takto získaných snímků bylo provedeno vyhodnocení následujících parametrů:

- poměr velikostí snímků
- posun středů snímků ve směrech x a y

5.3.5 Návrh hodnocení míry shody naskenované plochy

Cílem tohoto hodnocení bylo porovnat úroveň naskenované plochy v jednotlivých simulovaných a reálných záběrech skeneru. Z tohoto porovnání bude následně zřejmé, do jaké míry simulace odpovídá reálnému stavu. Byl hodnocen vliv následujících parametrů:

- přesnost modelu (sít' z CAD modelu vs. sít' získaná z fyzického dílu)
- hustota polygonální sítě
- parametry osvětlovacího modelu

Samotné získání dat měření pro každou pozici s využitím robota, 3D skeneru a softwaru ATOS Professional probíhalo následujícím způsobem:

1. Skenování z vypočítané pozice s vypočítaným expozičním časem
2. Polygonizace (vytvoření trojúhelníkové sítě) získaných dat s vyhlazením dat v úrovni „Standard“, která znamená vyhlazení 100% šumu měření
3. Získání informace o ploše polygonální sítě ze softwaru ATOS (viz Obr. 5-39, v obrázku je zvýrazněna hodnota plochy naskenovaných polygonů)

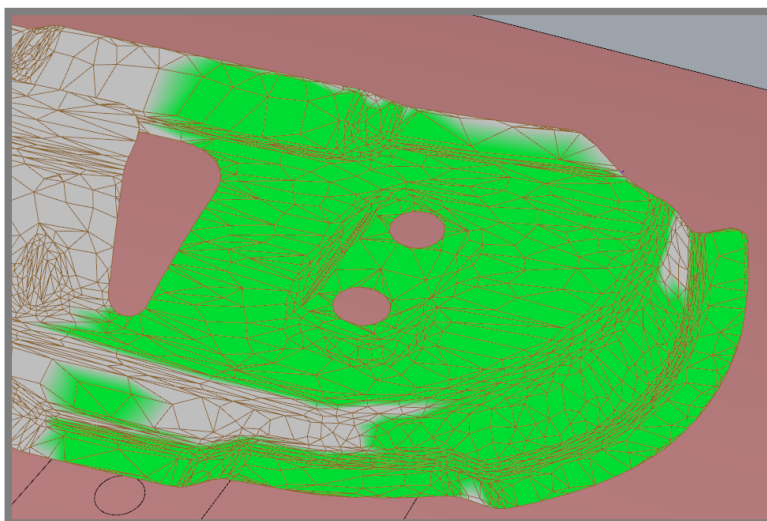
Získání simulovaných dat pro každou pozici probíhá následujícím způsobem:

1. Výpočet plochy viditelných polygonů z dané pozice (vypočteno v rámci simulace pozic, v Obr. 5-40 znázorněna plocha těchto polygonů)

Porovnání takto získaných dat probíhá jednoduše srovnáním plochy polygonů získaných v jednotlivých pohledech.



Obr. 5-39 Data pro pozici 0 získaná skenováním, zvýrazněna plocha polygonální sítě



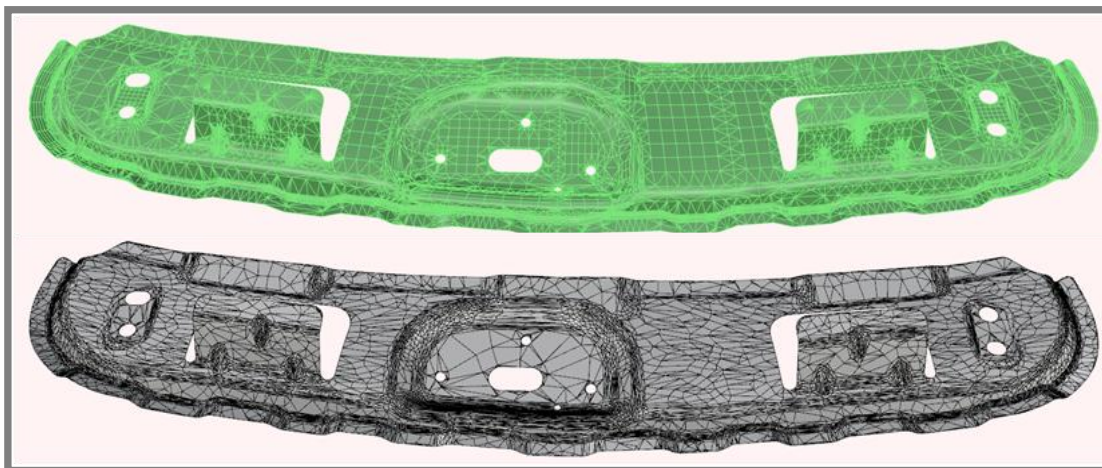
Obr. 5-40 Data pro pozici 0 získaná v simulaci

Vliv přesnosti modelu (sít' z CAD modelu vs. sít' získaná z fyzického dílu)

Jednou ze skutečností, která může ovlivnit rozdíl ve výsledné naskenované ploše v simulaci a ve skutečném měření, je přesnost polygonální sítě použitá pro generování pozic ve vztahu ke skutečnému dílu. V případě použití sítě vytvořené z CAD modelu je možné očekávat odchylky od skutečného fyzického dílu. Proto byl fyzický díl Plech1 naskenován a takto získaná sít' byla použita (ve zredukované

podobě) pro výpočet pozic skenování. Skutečné rozdíly mezi CAD modelem a naskenovaným fyzickým dílem jsou vidět na Obr. 5-35.

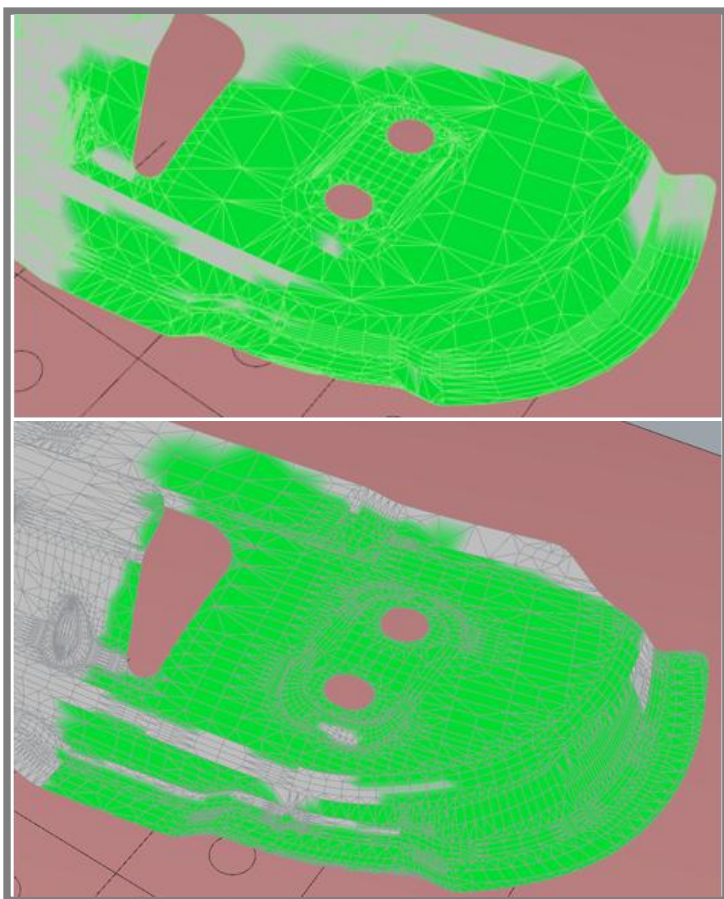
Z Obr. 5-41 je patrné, že i když mají obě sítě téměř stejný počet polygonů, je síť vytvořená z CAD modelu pravidelnější. Tato skutečnost může mít také vliv na výslednou naskenovanou plochu v simulaci v porovnání s reálným měřením, ale nebyla dále nijak hodnocena.



Obr. 5-41 Polygonální síť dílu Plech1 získané z CAD modelu (nahore) a ze skenování (dole)

Hustota polygonální sítě

Důvodem pro toto hodnocení je předpoklad, že vyšší hustota sítě umožní přesnější simulaci, především v části výpočtu viditelnosti polygonů pomocí osvětlovacího modelu. Tento rozdíl by se měl projevit především v místech s většími změnami křivosti. Ukázka zvýrazněné naskenované plochy v pohledech u modelů s různě hustou sítí je na Obr. 5-42. Pohledy na tomto obrázku jsou vygenerovány různě, proto se zvýrazněná plocha neshoduje.



Obr. 5-42 Simulace naskenovaných polygonů na různě husté síti dílu

Parametry osvětlovacího modelu

Vliv osvětlovacího modelu je ověřen použitím parametrů získaných pro jeden typ materiálu na plechový díl s odlišnými vizuálními vlastnostmi. Konkrétně se jedná o aplikaci parametrů získaných pro materiál dílu Plech1 na výpočet pozic a expozičních časů pro díl Plech2. Parametry osvětlovacího modelu, použité pro toto měření, jsou uvedeny v kapitole 5.2.8.

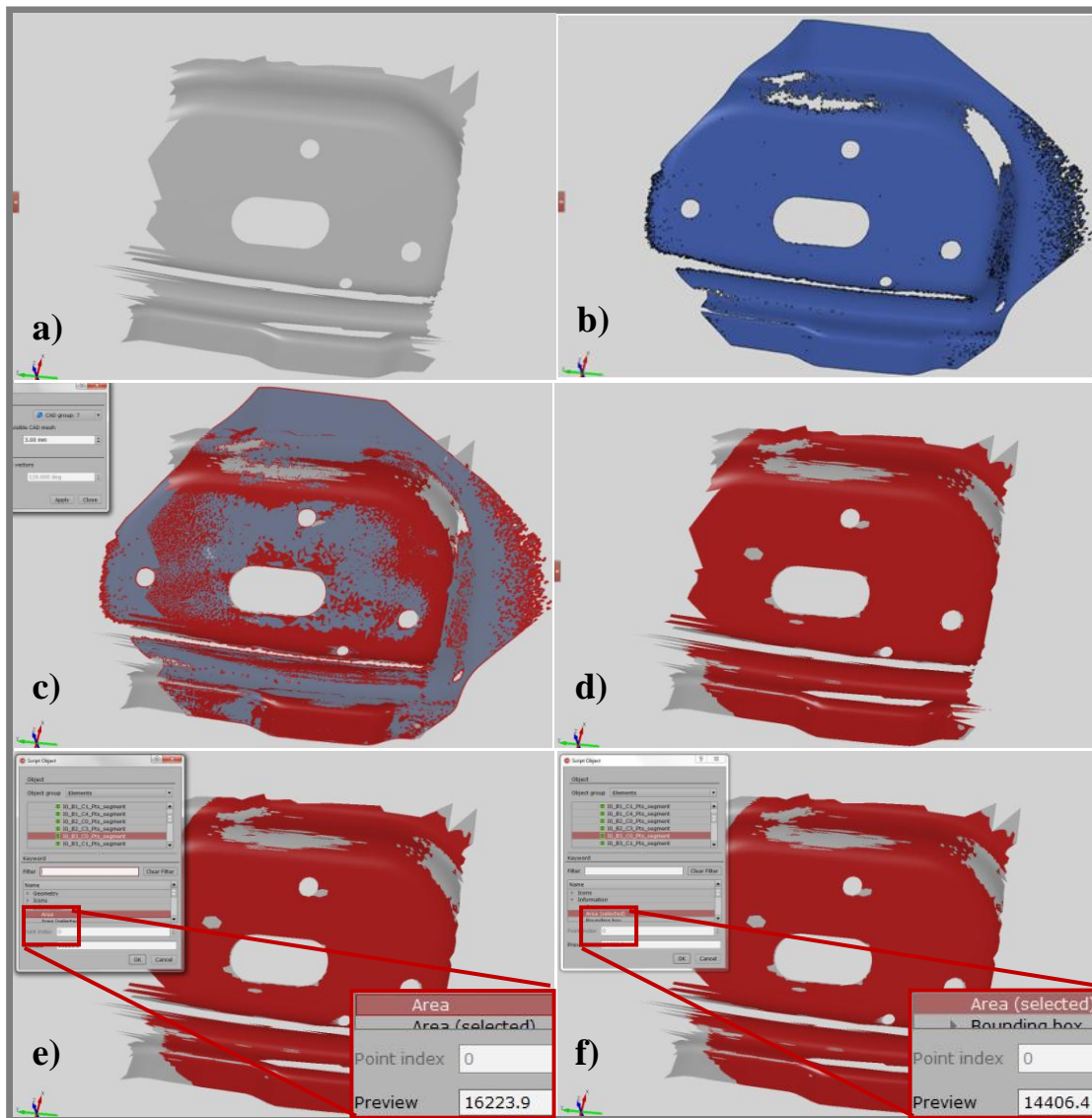
5.3.6 Návrh hodnocení zaznamenání polygonů segmentů

Důležitým krokem v navržené metodice je rozdělení měřeného dílu na jednotlivé segmenty, pro které se následně počítají pozice měření. V navržené metodice je použita metoda dělení na krychle podle velikosti měřicího objemu a následně na segmenty dle normál polygonů v těchto krychlích (podrobněji viz kapitola 5.2.3).

Cílem následného hodnocení bylo ověření, jaká část segmentu, pro nějž byla pozice generována, byla skutečně naskenována, a jak je tedy tato metoda segmentace efektivní. Postup pro toto ověření je následující (viz Obr. 5-43):

1. Export polygonální sítě obsahující polygony daného segmentu ze softwaru Rhinoceros
2. Import do softwaru ATOS Professional a zhuštění sítě pro účely přesnějšího výpočtu plochy (viz Obr. 5-43 a)
3. Import polygonální sítě získané skenováním z pozice vygenerované pro daný segment (viz Obr. 5-43 b)

4. Výběr polygonů segmentu v místech, kde dochází k překryvu s naskenovanými daty s využitím funkce „Select by mesh“ (viz Obr. 5-43 c - d)
5. Výsledkem je celková plocha polygonů segmentu a plocha vybraných polygonů a následně jejich porovnání (viz Obr. 5-43 e - f)



Obr. 5-43 Proces výběru polygonů segmentu, kde dochází k překryvu se skenovanými daty

6 ANALÝZA A INTERPRETACE

Obsahem této kapitoly je hodnocení navržené metodiky na základě experimentálních měření a jejich statistického zpracování. Měření byla provedena na dvou plechových dílech s využitím 3D skeneru ATOS Triple Scan a průmyslového robota KUKA KR 60 HA. Hodnocení navržené metodiky je uspořádáno stejným způsobem, jako metodika hodnocení uvedená v kapitole 5.3.3. Na základě zpracovaného hodnocení jsou vyvozeny obecné závěry k navržené metodice. Data získaná z experimentálních měření byla vyhodnocena s využitím softwaru Statistica 10.

6.1 Srovnání ruční přípravy pozic robota a automatizovaného přístupu

6.1

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky pro ruční přípravu pozic měření a automatické generování pozic.

Ruční příprava pozic

Tabulka 14 uvádí čas potřebný k ruční přípravě pozic robota pro následné měření dílu Plech1. Zároveň uvádí počet pozic měření, které byly zaznamenány a počet pozic, které bylo nutné v průběhu přípravy nahrazovat z důvodu jejich nevhodnosti (málo nových naskenovaných dat). Ruční příprava pozic byla dvakrát zopakována z důvodu ověření potřebného času a počtu pozic pro kompletní naskenování dílu.

Tabulka 14 Parametry ruční přípravy pozic pro měření dílu Plech1

Parametry modelu	Čas přípravy pozic	Počet pozic měření	Počet smazaných (opravených) pozic
<i>Plech1</i>	1:12 h	31	11
<i>Plech1</i>	1:13 h	30	10

Automatické generování pozic

Tabulka 15 shrnuje výsledky automatické přípravy pozic měření. Ta je připravena pro dva testovací díly a jejich modely s různým nastavením polygonální sítě (dle kapitoly 5.3.2). V tabulce jsou uvedeny časy potřebné pro generování pozic měření a jejich celkový počet pro každý z použitých modelů. Uvedeny jsou zároveň časy potřebné pro výpočet map viditelnosti, protože se jedná o časově nejnáročnější část v generování pozic.

Tabulka 15 Výsledné parametry automatického generování pozic

Parametry modelu	Celkový čas generování pozic [mm:ss]	Čas výpočtu VM [mm:ss]	Počet vygenerovaných pozic
Plech1			
P1_CAD_10000	11:20	8:05	34
P1_CAD_30000	36:30	30:55	37
P1_SKEN_10000	10:40	8:25	33
P1_SKEN_30000	35:20	25:35	40
Plech2			
P2_SKEN_10000	10:55	8:35	38
P2_SKEN_30000	35:10	28:30	46 (1 nedostupná)

6.1.1 Porovnání času přípravy měřicích pozic

Porovnáním časů z tabulek (Tabulka 14 a Tabulka 15) dojdeme k závěru, že díky automatické přípravě pozic dojde k úspoře času o (50 – 85) % v porovnání s jejich ruční přípravou, což lze považovat za velký přínos. Výše úspory času závisí z největší míry na hustotě použité polygonální sítě (což je předmětem zhodnocení v kapitole 6.1.4). U složitějších dílů, kde lze očekávat i síť s větším množstvím polygonů, však můžeme také očekávat delší čas ruční přípravy pozic a úspora času by tedy měla zůstat na obdobné úrovni.

Asi (70 – 85) % času celého výpočtu tvoří výpočet map viditelnosti. Možná optimalizace v tomto výpočtu je uvedena v kapitole 6.5.2. Výhodou map viditelnosti však je, že pro stejný model (polygonální síť) stačí tento výpočet provést jednou a v případě opakovaného výpočtu (například s pozměněnými parametry osvětlovacího modelu) už se mapy viditelnosti pouze načtou pro nové generování pozic.

U parametrů výpočtu pro P1_SKEN_30000 je možné zaznamenat velký rozdíl mezi časem výpočtu VM a celkovým časem generování pozic. Tento rozdíl je způsoben časově náročnou simulací, kdy byla opakovaně testována pozice, která nebyla robotem nijak dosažitelná. Protože se v ní testovalo všech 36 možných pozic, výrazně narostl čas simulace a celého výpočtu.

6.1.2 Porovnání počtu vygenerovaných měřicích pozic

Ze srovnání počtu vygenerovaných pozic (Tabulka 14 a Tabulka 15) je patrné, že v automatickém generování došlo k nárůstu počtu pozic o (6,5 – 33) %. Nejedná se o nijak extrémní nárůst, v ideálním případě jde o nárůst o dvě měřicí pozice. V případě použití u sériového měření bude však dále cílem dosáhnout srovnatelného nebo nižšího počtu pozic. Možná optimalizace ve výsledném počtu generovaných pozic je uvedena v kapitole 6.5.3.

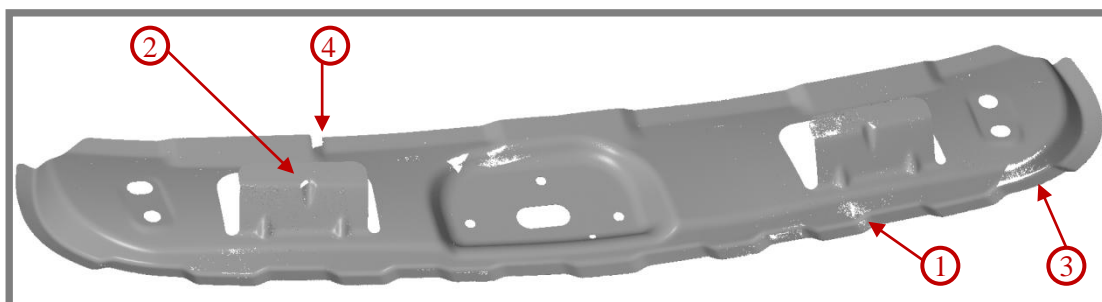
6.1.3 Zhodnocení kompletnosti naskenovaných dat

Dalším kritériem hodnocení je kompletnost naskenovaných dat. Ta vypovídá o schopnosti navržené metodiky a vytvořeného softwaru vypočítat takové pozice, ze kterých dojde při následném měření k naskenování celého dílu. Kompletnost naskenovaných dat byla posuzována na základě porovnání celkového obsahu plochy

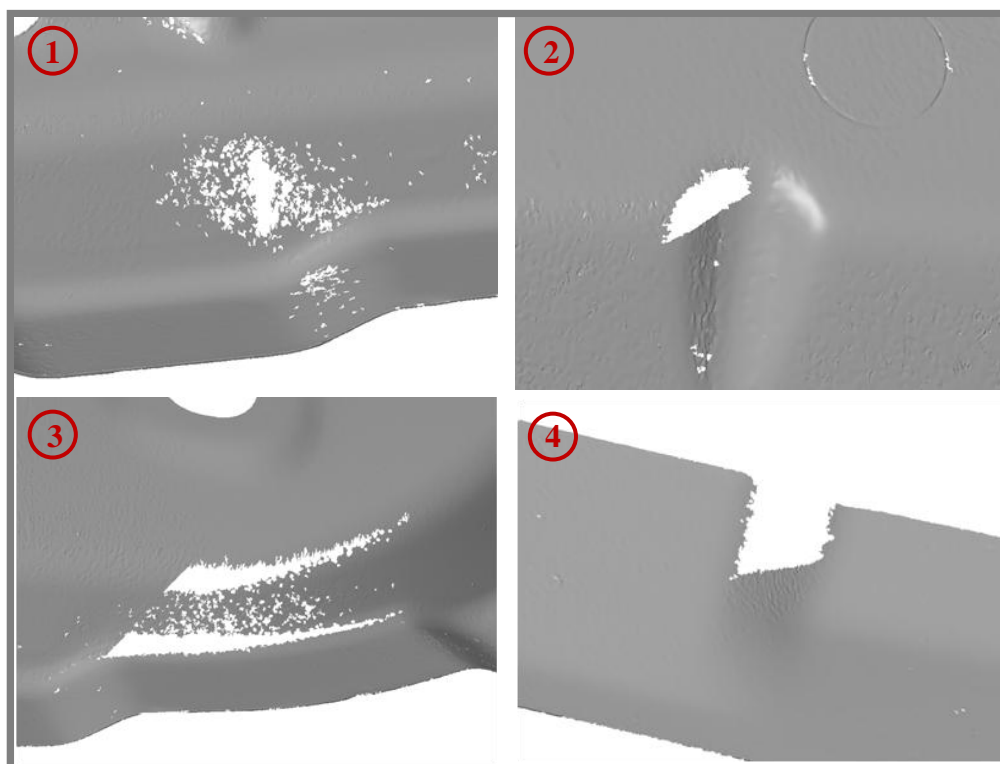
polygonální síť modelu použitého ke generování a obsahu plochy sítě získané při skenování. Výsledky tohoto srovnání obsahuje Tabulka 16. Z těchto výsledků vyplývá, že u všech měření jsou rozdíly do 1 %. Polygonální síť získaná z měření pro P1_CAD_10000 je na Obr. 6-1. Na Obr. 6-2 jsou zvýrazněna místa z tohoto měření, kde nedošlo k naskenování části dat. Zejména v místech 1 a 3 je to z důvodu přítomnosti vícenásobných odrazů. Tento problém je dále rozebrán v kapitole 6.3.3. Zajímavé je, že i u dílu Plech2 došlo k naskenování plochy s rozdílem do 1 % vůči ploše modelu. Důvodem je použití osvětlovacího modelu pro lesklejší materiál na díl z mírně matnějšího materiálu. V některých místech tedy dojde k naskenování většího množství dat v porovnání se simulací. Neplatí to ovšem obecně, materiál se jeví jako světlejší a tak při vypočítaných expozičních časech dojde snadno k saturaci.

Tabulka 16 Porovnání plochy celého dílu (modelu) a plochy naskenované

Parametry modelu	Plocha modelu [mm ²]	Celkově naskenovaná plocha [mm ²]	Rozdíl [mm ²]	Rozdíl [%]
<i>Plech1</i>				
<i>P1_CAD_10000</i>	124434	123588	845,6	0,68
<i>P1_CAD_30000</i>	124751	123631	1120	0,91
<i>P1_SKEN_10000</i>	123877	123328	549	0,45
<i>P1_SKEN_30000</i>	123914	123896	18	0,01
<i>Plech2</i>				
<i>P2_SKEN_10000</i>	115884	115019	865	0,75
<i>P2_SKEN_30000</i>	115857	115010	847	0,74



Obr. 6-1 Naskenovaná data celého dílu pro P1_CAD_10000 s vyznačenými nedostatky v síti



Obr. 6-2 Nenaskenovaná místa v dílu P1_CAD_10000

6.1.4 Vliv hustoty polygonální sítě

Tabulka 15 dokazuje, že hustota polygonální sítě negativním způsobem ovlivňuje počet vygenerovaných pozic měření. U provedených experimentálních měření se rozdíl počtu pozic u stejného modelu s různým nastavením hustoty polygonální sítě liší v rozsahu 9–21 %. V případě P1_SKEN a P2_SKEN je to způsobeno generováním pozic pro více segmentů. Do nich totiž spadají například malé polygony (se svými normálami) na okrajích dílu, které nejsou orientované v hladké návaznosti na okolní plochu dílu. Ve všech třech případech (P1_CAD_30000, P1_SKEN_30000 a P2_SKEN_30000) jsou některé pozice navíc (v porovnání s korespondujícími modely s menším počtem polygonů) vygenerované ve vyšších iteracích. Důvodem je přesnější simulace důsledků osvětlení projektořem a tím nenaskenování některých míst modelu, a proto nutnost doplnit tato místa v dalších krocích iterace.

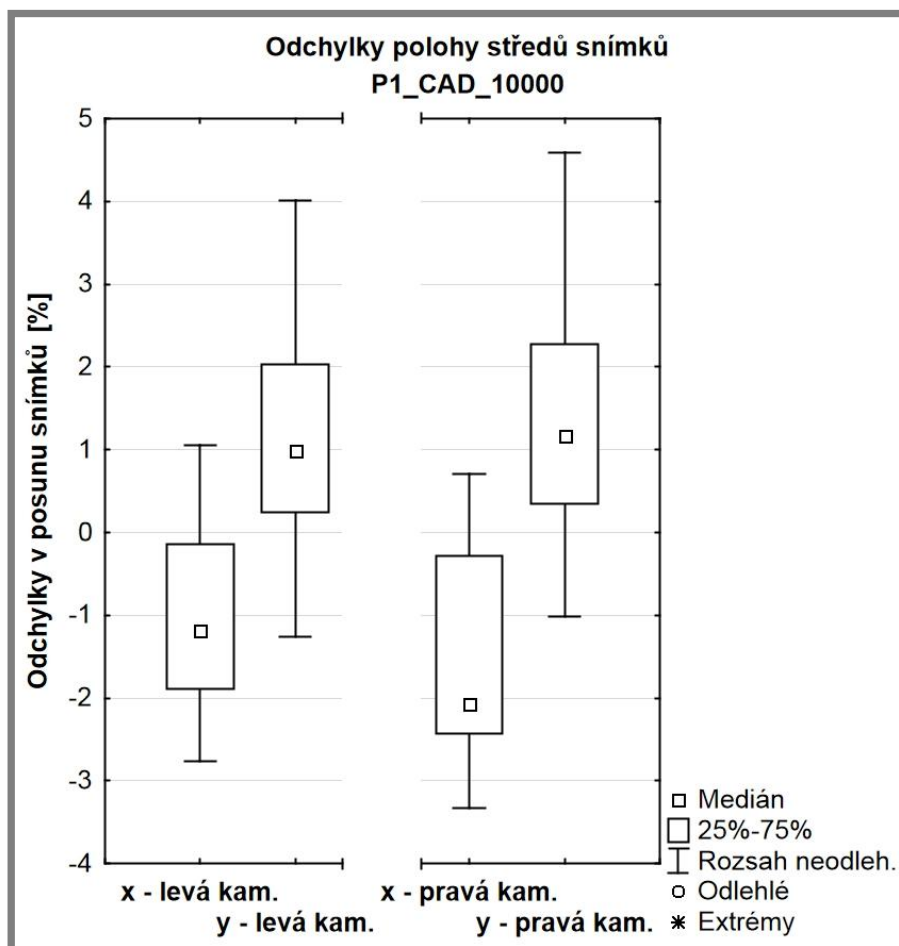
Vliv hustoty polygonální sítě na čas generování pozic je zjevný, viz Tabulka 15. Jak u výpočtu map viditelnosti, tak u celkového výpočtu pozic je patrný lineární nárůst času v závislosti na počtu polygonů sítě. Hustota polygonální sítě tedy zásadním způsobem ovlivňuje čas potřebný pro výpočet pozic měření.

6.2 Zhodnocení shody simulovaných pozic s reálnými

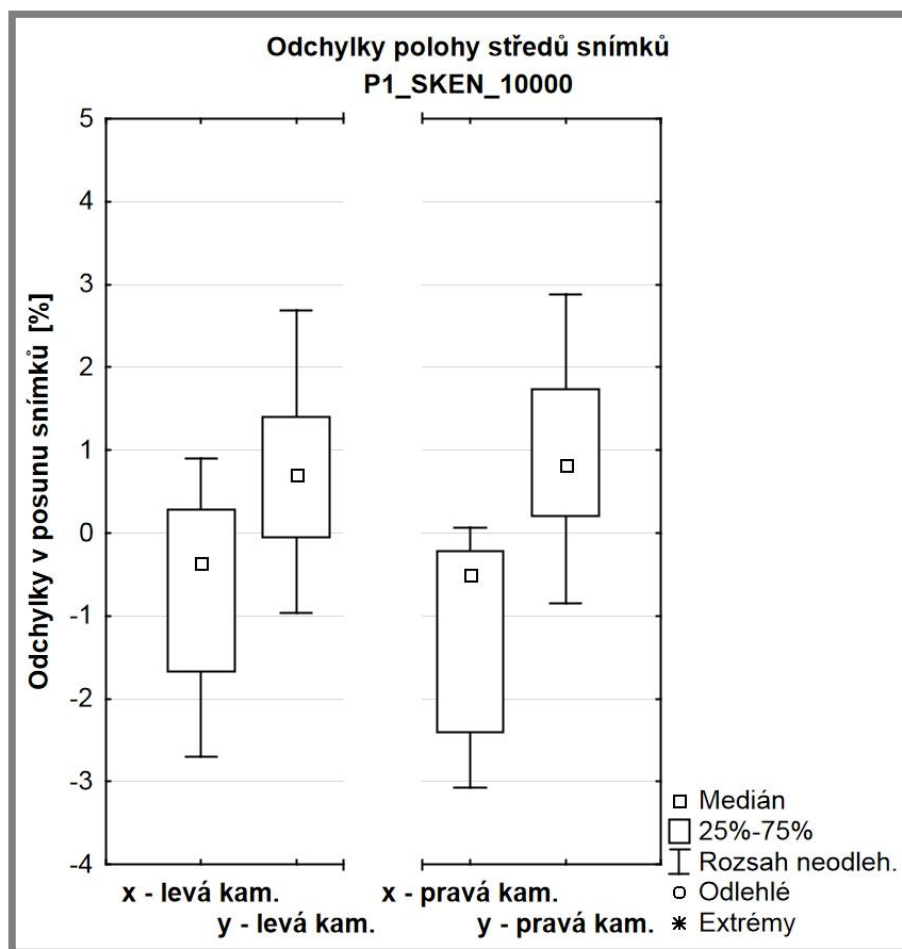
K porovnání shody simulovaných pozic s reálnými (na základě snímků z těchto pozic a podle postupu popsaného v kapitole 5.3.4) byla vybrána data ze skenování s nastavením P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000. Na porovnání těchto dvou měření by se mělo také prokázat, jaký vliv má přesnost použitého modelu na přesnost simulovaných pozic.

6.2.1 Porovnání poloh středů snímků

Poloha středů snímků byla vyhodnocena zvlášť ve směru x a y pro nezávislé určení odchylek v těchto směrech. Odchylka polohy středů je vyhodnocena jako procentuální odchylka vzhledem k rozměrům reálného snímku. Tabulka 17 uvádí data získaná na základě měření pro oba modely (P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000), Obr. 6-3 a Obr. 6-4 tato data znázorňují v krabicových grafech. Odchylky jsou vypočítány a zobrazeny v reálných hodnotách, aby byla pozorovatelná případná nesymetrickost dat.



Obr. 6-3 Odchylky v poloze středů snímků u měření dle modelu P1_CAD_10000



Obr. 6-4 Odchyly v poloze středů snímků u měření dle modelu P1_SKEN_10000

Tabulka 17 Výsledky porovnání poloh středů snímků. Výsledky v [%].

Model / směr	Min ⁹	Q _{0,25}	Medián	Q _{0,75}	Max	Rozpětí ¹⁰
PI_CAD_10000						
x – levá kamera	-2,77	-1,88	-1,18	-0,14	1,05	3,82
y – levá kamera	-1,26	0,24	0,98	2,04	4,02	5,28
x – pravá kamera	-3,33	-2,43	-2,06	-0,29	0,71	4,04
y – pravá kamera	-1,01	0,34	1,17	2,28	4,58	5,59
PI_SKEN_10000						
x – levá kamera	-2,70	-1,67	-0,36	0,29	0,90	3,60
y – levá kamera	-0,96	-0,05	0,71	1,40	2,69	3,65
x – pravá kamera	-3,07	-2,40	-0,50	-0,21	0,06	3,13
y – pravá kamera	-0,85	0,21	0,83	1,73	2,87	3,72

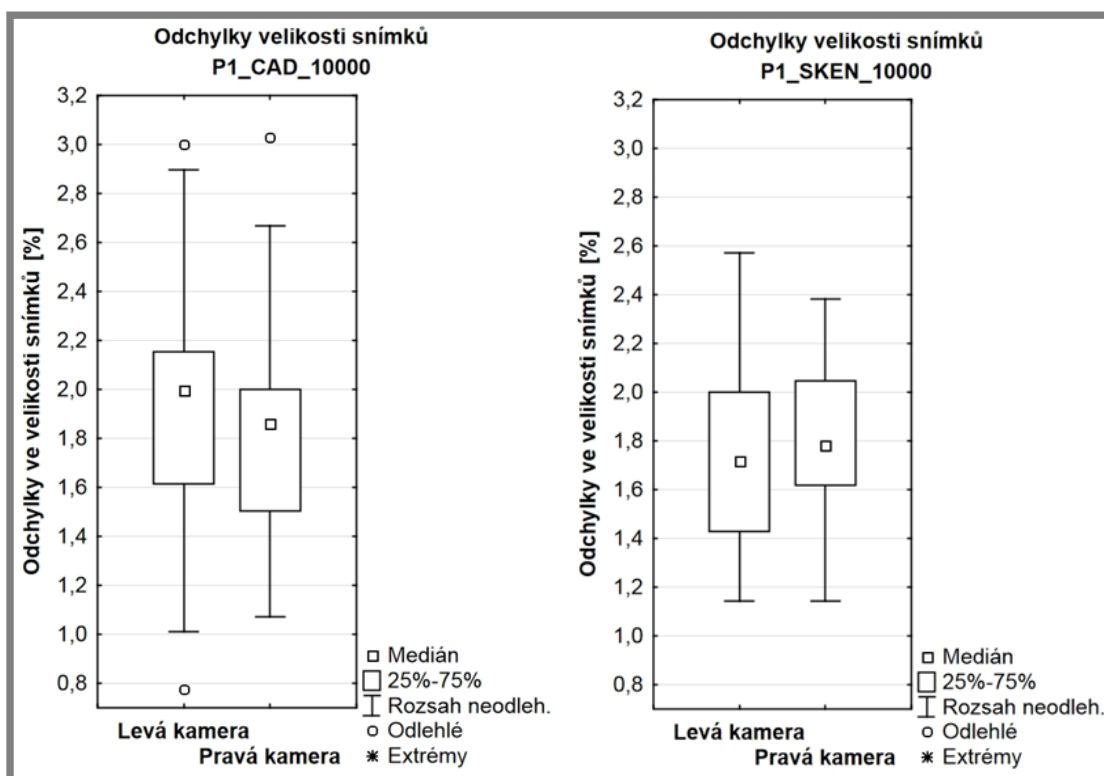
⁹ Min a Max jsou minimální a maximální neodlehle hodnoty, viz Obr. 6-6.¹⁰ Rozpětí je uvedeno pro všechny naměřené hodnoty, proto se jeho hodnota nemusí vždy shodovat s rozdílem Min a Max

Odchyly v poloze simulovaných a reálných snímků, jejichž medián se pohybuje do hodnot okolo 2 % a maximální odchylka je 4,6 %, lze považovat za velmi dobré. Z porovnání grafů v Obr. 6-3 a Obr. 6-4 vyplývá, že odchyly v poloze snímků jsou nižší u modelu získaného skenováním dílu (P1_SKEN_10000). Zde je také pozorovatelný razantnější absolutní pokles odchylky ve směru x. Pro něj se však nepodařilo najít dobré vysvětlení. Pokles odchylek ve směru y je možné připsat použití přesnějšího modelu, protože u CAD modelu jsou v některých místech pozorovatelné vyšší odchylky právě ve vertikálním směru. Ten je často ve shodě se směrem y ve výsledných snímcích.

Celkově lze odchylky v poloze snímků a tedy i poloze samotných pozic měření připsat nepřesnostem v ustavení měřeného dílu a tyto odchylky by bylo možné odstranit provedením vhodné kalibrace pro stanovení přesné polohy měřeného dílu v prostoru v porovnání s jeho modelovou polohou.

6.2.2 Porovnání velikostí snímků

Odchyly ve velikosti snímků byly porovnávány opět zvlášť pro levou a pravou kameru a byly vyhodnocovány u modelů P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000. Tabulka 18 obsahuje výsledky těchto porovnání, grafická podoba je na Obr. 6-5.



Obr. 6-5 Procentuální odchyly ve velikosti snímků u modelů P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000

Tabulka 18 Výsledky porovnání velikostí snímků. Výsledky v [%].

Model / kamera	Min	Q _{0,25}	Medián	Q _{0,75}	Max	Rozpětí
<i>P1_CAD_10000</i>						
Levá kamera	1,01	1,62	2,00	2,16	2,90	2,23
Pravá kamera	1,07	1,51	1,86	2,00	2,67	1,96
<i>P1_SKEN_10000</i>						
Levá kamera	1,14	1,43	1,72	2,00	2,57	1,43
Pravá kamera	1,14	1,62	1,78	2,05	2,38	1,24

Medián odchylek velikosti snímků se pohybuje do 2 %, což je hodnota, která simulaci ovlivňuje minimálním způsobem. Všechny hodnoty jsou kladné, protože simulovaný snímek je vždy menší než snímek z měření. Menší odchylky lze pozorovat opět u modelu P1_SKEN_10000. Vzhledem k tomu, že rozdíl hodnoty mediánu mezi těmito dvěma měřeními je na podobné úrovni jako rozdíl hodnot mezi dvojicemi kamer, lze vliv použitého modelu na velikost snímku považovat za zanedbatelný.

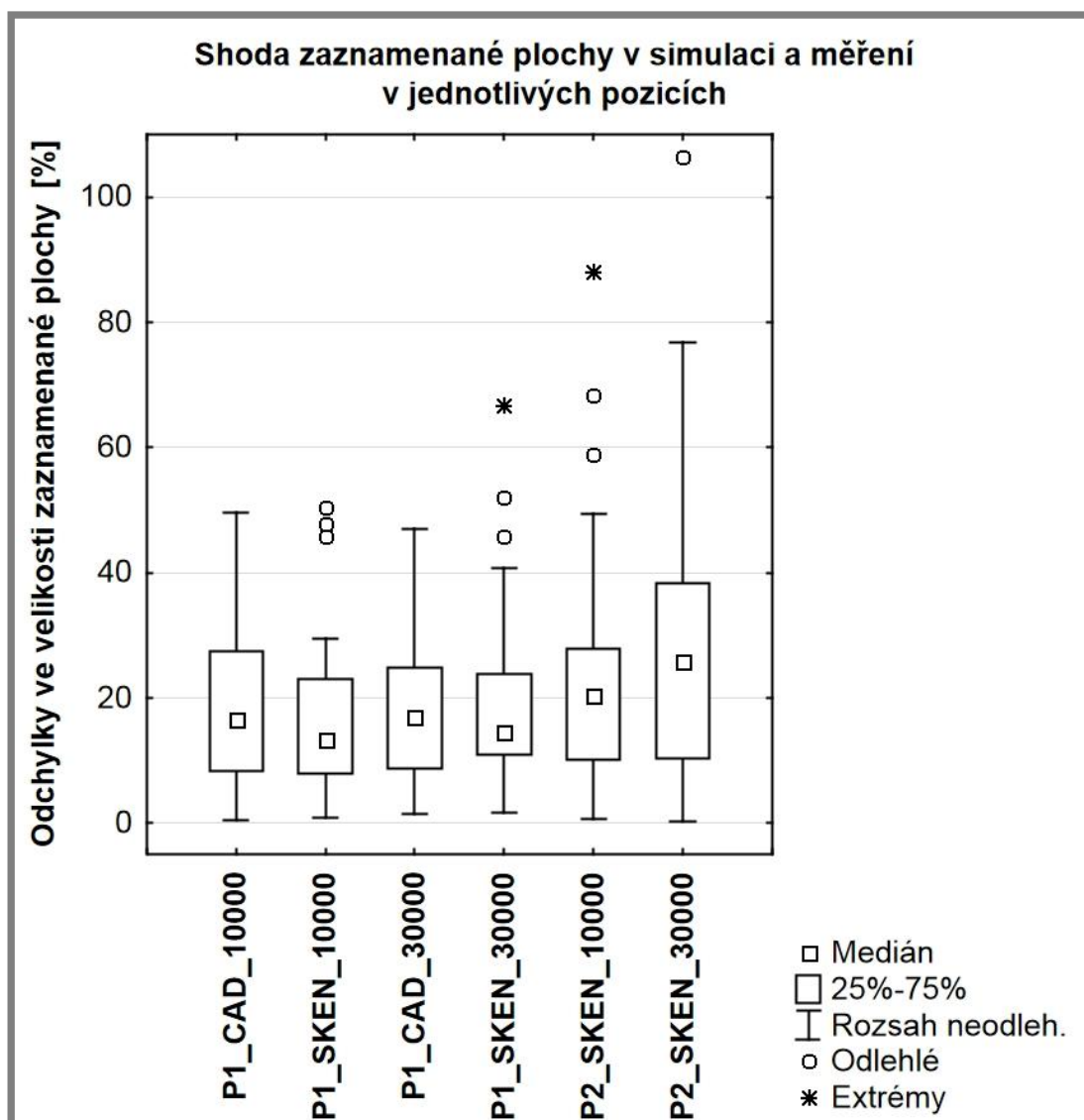
Odchylky ve velikosti snímku mohou být způsobeny nepřesnostmi ve vzdálenosti mezi kamerou středem měřicího objemu zanesené ve výpočtu a odvozené v kapitole 5.1.1. Další možností je vliv nepřesnosti v pozici báze robota v modelu a ve skutečnosti. Tento vliv by bylo možné ověřit provedením vhodné kalibrace, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole.

6.3 Zhodnocení shody naskenované plochy v simulaci a v měření

Podle postupu popsání v kapitole 5.3.5 bylo provedeno porovnání obsahu plochy polygonů naskenovaných v reálném měření a získaného v simulaci. Výsledky byly získány pro jednotlivé skenovací pozice a byly dále vypočítány základní statistické veličiny tohoto souboru dat, viz Tabulka 19 a grafická podoba na Obr. 6-6. Kompletní data, získaná pro P1_CAD_30000 z jednotlivých měření a simulace, jsou uvedena jako příloha na straně 130. Z těchto dat je vidět, že rozdíl v naměřených a simulovaných plochách se pohybuje v množině reálných čísel, tedy že simulovaná plocha je vůči naměřené menší, ale i větší. Pro posouzení odchylek v následujícím grafu však byly uvažovány absolutní hodnoty těchto odchylek.

Tabulka 19 Výsledky porovnání zaznamenané plochy. Výsledky v [%].

Model	Min	Q _{0,25}	Medián	Q _{0,75}	Max	Rozpětí
<i>P1_CAD_10000</i>	0,4	8,3	16,6	27,5	49,6	49,2
<i>P1_SKEN_10000</i>	0,9	8,0	13,4	23,1	29,6	49,6
<i>P1_CAD_30000</i>	1,4	8,6	17,0	24,9	46,9	45,5
<i>P1_SKEN_30000</i>	1,8	11,0	14,5	28,8	40,8	64,9
<i>P2_SKEN_10000</i>	0,7	10,2	20,4	27,8	49,5	87,3
<i>P2_SKEN_30000</i>	0,3	10,6	25,8	38,3	76,8	106,0



Obr. 6-6 Odchyly v zaznamenané ploše v simulaci a v měření

6.3.1 Posouzení vlivu použití skenovaného modelu místo CAD modelu

K posouzení tohoto vlivu uvažujeme data z grafů na Obr. 6-6, z dvojic modelů plechu se stejným nastavením, ale s rozdílem v použité polygonální síti, tedy dvojice (P1_CAD_10000, P1_SKEN_10000) a (P1_CAD_30000, P1_SKEN_30000). Z výsledků v těchto grafech, především z hodnoty mediánu, je patrné, že použití polygonální sítě získané skenováním fyzického dílu má kladný efekt na velikost odchylek v získaných plochách v simulaci a reálném měření. Tento kladný efekt je možné připsat větší shodě v simulované a skutečné pozici vůči měřenému dílu (což je ve shodě se závěry z kapitoly 6.2.1) a tím pádem i přesnější simulaci. Z hodnot mediánu je však zároveň patrné, že tento rozdíl není příliš velký.

Z praktického hlediska je však aplikace uvedených závěrů spíše nereálná. Znamenalo by to získat data fyzického měřeného dílu pro samotné generování pozic, což je absurdní. Jako reálná se však jeví praxe, která se poměrně často využívá, kdy se data měřených dílů porovnávají s prvním kusem v sérii. Z naskenovaných dat prvního kusu série by tedy mohly být zároveň generovány pozice měření pro celou sérii.

6.3.2 Posouzení vlivu hustoty polygonální sítě

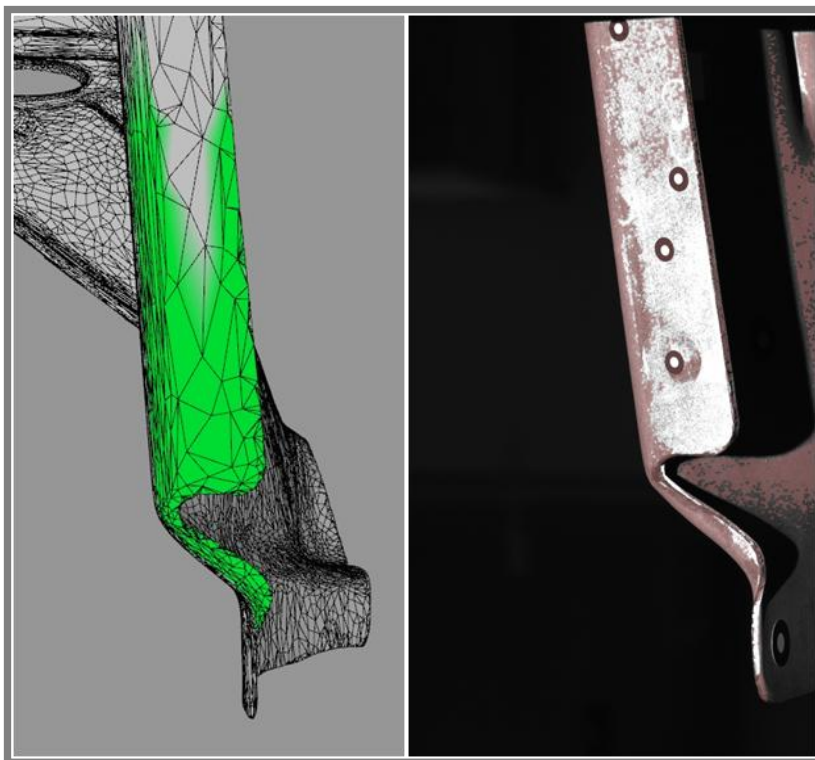
Vliv hustoty polygonální sítě na odchylky v naskenované ploše byl porovnáván u dvojic P1_CAD_10000/30000, P1_SKEN_10000/30000 a P2_SKEN_10000/30000. Z grafu na Obr. 6-6 pro tyto dvojice vyplývá, že tento vliv není u dílu Plech1 pozorovatelný. Velmi blízké jsou jak hodnoty mediánu, tak i kvartily $Q_{0,25}$ a $Q_{0,75}$. Celkově lze tedy považovat vliv hustoty polygonální sítě na odchylky v naskenované ploše v simulaci a reálném měření u provedených měření u dílu Plech1 za zanedbatelný.

U dílu Plech2 jsou rozdíly v odchylkách větší, odchylka mediánu je v této dvojici výrazně větší než u dvojic dílu Plech1. Způsobeno to bude pravděpodobně větším počtem pozic měření u P2_SKEN_30000, které byly vygenerovány z důvodu většího množství malých polygonů na okrajích dílu (viz Obr. 6-7). Takto vygenerované pozice i kvůli jiným vlastnostem povrchu a neodpovídajícímu osvětlovacímu modelu zvyšují odchylky v naskenované ploše, v simulaci a reálném měření (viz Obr. 6-8).

Pro vyvození obecnějších závěrů by však bylo nutné provést simulaci a měření s větším množstvím nastavení hustoty polygonální sítě, což je však značně časově náročné.



Obr. 6-7 Malé a někdy chybně orientované polygony na okrajích dílu



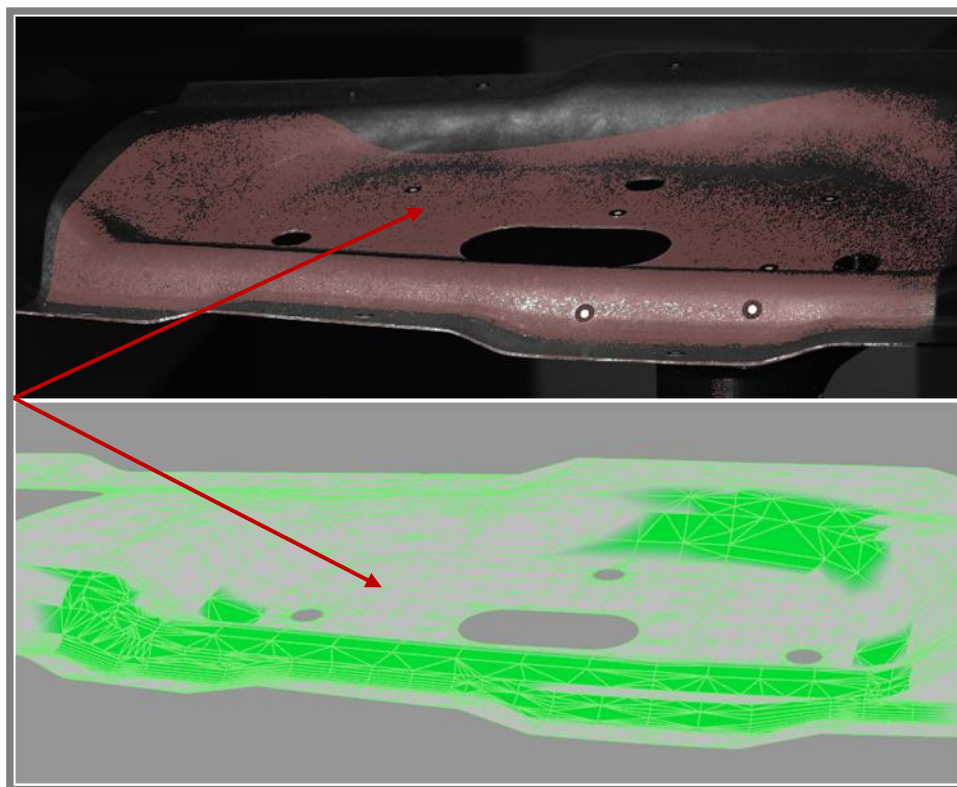
Obr. 6-8 Rozdíl v simulované a skutečně naměřené ploše u dílu Plech2

Vlivu hustoty polygonální sítě by zasloužilo detailnější zhodnocení. Vliv hustoty sítě v místech s většími změnami křivosti, kde by hustota sítě měla mít větší vliv, nebylo možné v hodnocení pomocí srovnání plochy posoudit.

6.3.3 Posouzení vlivu osvětlovacího modelu

Jak už bylo nastíněno v předchozí kapitole, správné nastavení parametrů osvětlovacího modelu má zásadní vliv na korektní simulaci měření. V případě dílu Plech2, na který byly aplikovány parametry získané pro materiál dílu Plech1, jsou z výsledků patrné větší odchylky zaznamenané plochy. Ve srovnání s výsledky pro model P1_SKEN (jedná se také o model získaný skenováním fyzického dílu) je medián těchto odchylek větší o (7 – 12,4) %. Vliv tedy není nijak zásadní. Je to dáno také podobnými vizuálními vlastnostmi obou použitých plechových dílů.

Zároveň je značný vliv správného nastavení parametrů modelu možné pozorovat u dílu Plech1, pro nějž byly tyto parametry experimentálně odvozeny. Odchylky v obsahu simulované a skutečně naměřené plochy v jednotlivých pohledech, jak už bylo zmíněno v úvodu kapitoly 6.3, dosahují jak kladných tak záporných hodnot. Z toho vyplývá, že nelze jednoznačně říct, že je osvětlovací model nastaven příliš konzervativně a nezaznamenává polygony s příliš vysokou vypočítanou hodnotou šedi nebo naopak s příliš nízkou. Vlivy, které to způsobují, bude ještě nutné dále hlouběji zkoumat. Příkladem může být záběr z pozice 12 při měření dle modelu P1_CAD_10000 na Obr. 6-9. V simulaci nebyla vůbec zaznamenána část plochy (v obrázku naznačeno šipkami).



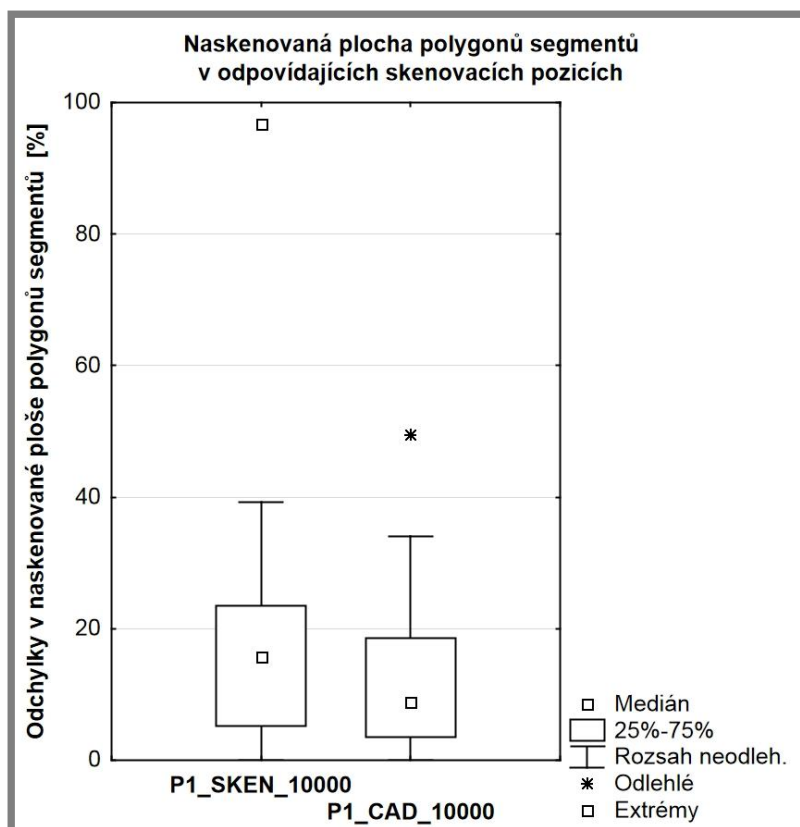
Obr. 6-9 Rozdíl v simulované a naměřené ploše u dílu Plech1 v pozici 12

6.4 Zhodnocení zaznamenání polygonů segmentů

Pro zhodnocení navržené metody segmentace dílu byla porovnávána celková plocha polygonů segmentu s plochou segmentu, která byla v příslušném záběru, vygenerovaném pro tento segment, naskenována (blíže postup porovnání viz kapitola 5.3.6). K tomuto hodnocení bylo zvoleno měření na základě modelů P1_SKEN_10000 a P1_CAD_10000. Výsledky hodnocení obsahuje Tabulka 20 a v grafické podobě jsou uvedeny na Obr. 6-10.

Tabulka 20 Výsledky porovnání zaznamenání polygonů segmentu z příslušné pozice v [%]

Model	Min	Q _{0,25}	Medián	Q _{0,75}	Max	Rozpětí
<i>P1_SKEN_10000</i>	0	5,21	15,82	23,53	39,22	96,71
<i>P1_CAD_10000</i>	0	3,47	8,82	18,50	33,99	49,48

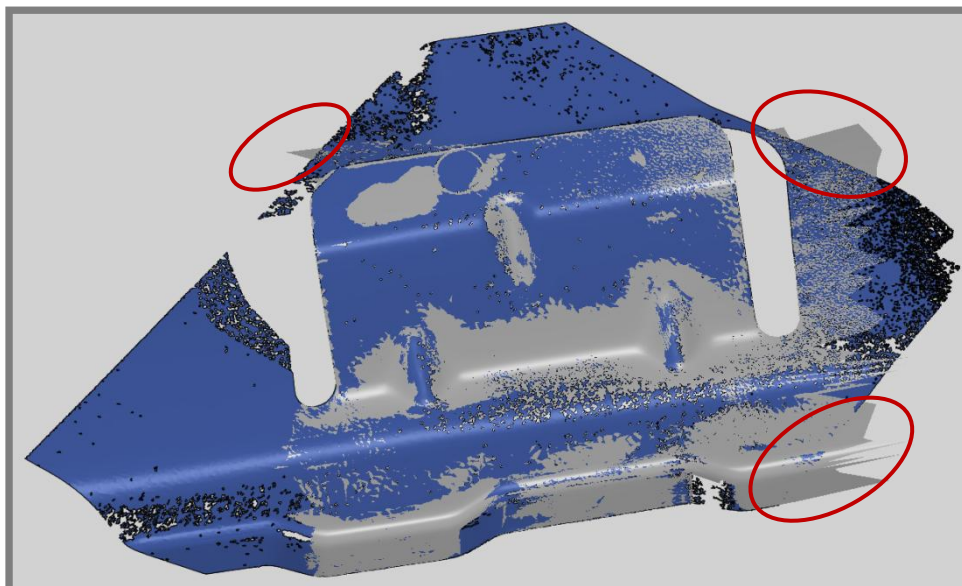


Obr. 6-10 Odchylky v zaznamenané ploše segmentů

Z výsledků zaznamenání polygonů segmentů je zřejmé, že medián odchylek je u dvou zkoumaných měření v rozmezí (8,8 – 15,8) %. Pokud uvažujeme, že segmenty jsou vytvořeny tak, aby se polygony do nich spadající v příslušných pohledech naskenovaly, je to hodnota poměrně vysoká. Jedním důvodem, proč se polygony nezaznamenají, je přítomnost odlesků, které při segmentaci není možné uvažovat. Druhým důvodem je fakt, že při natočení skeneru vůči segmentu o 45°, podobně jako na Obr. 6-11, budou části segmentu mimo zorné pole skeneru. Předmětem dalšího testování bude tedy dělení dílu na menší segmenty.

Rozdíl ve výsledcích pro P1_SKEN a P1_CAD je poměrně velký (7 %) a může být způsoben vlivem nepravidelných a dlouhých polygonů sítě u modelu P1_SKEN. Rozdíl může být dán jen odlišně vygenerovanými pozicemi a vliv přesnosti modelu na zaznamenání polygonů segmentu by bylo nutné ověřit více měřeními.

Odlehlá hodnota v případě modelu P1_SKEN_10000 je hodnotou pro velmi malý segment, u něhož se nenaskenování projeví extrémní odchylkou (viz příloha na straně 131, měření 27).



Obr. 6-11 Nenaskenované části segmentu, způsobeno natočením skeneru

6.5 Zhodnocení navržené metodiky

V následujících oddílech je zhodnocena navržená metodika a především jednotlivé použité metody a jsou uvedeny možnosti optimalizace těchto metod, které vyvstaly v průběhu řešení a díky analýze výsledků.

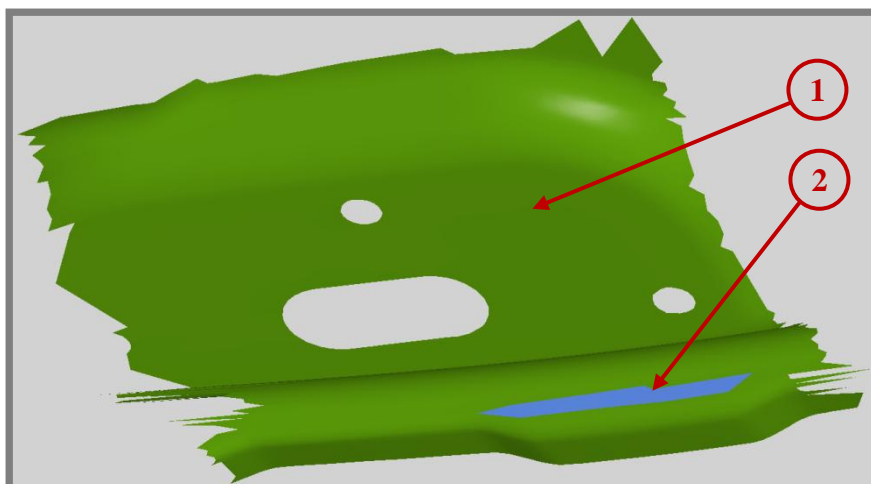
6.5.1 Metoda segmentace

Navržená metoda segmentace se u měření testovacích dílů ukázala jako poměrně dobrá, což dokládají výsledky v předchozí kapitole 6.4. Zároveň se ukázaly některé její nedostatky:

1. Vytváření malých segmentů kvůli chybně orientovaným polygonům
2. U velkých plošných dílů nepoměr ve velikosti vytvořených segmentů (viz Obr. 6-12, čísla a barvy odlišují jednotlivé segmenty)
3. Nenaskenování částí segmentů z důvodů jeho velikosti a orientaci skeneru

Optimalizace

Problém s chybně orientovanými polygony na okrajích dílu by mohl být odstraněn vhodnou metodou filtrace před samotnou segmentací. Jedná se také o problém vznikající především u modelů ze skenovaných dat, které se v praxi nevyužívají tak často. Problém v nepoměru velikosti segmentů lze vyřešit dělením dle povrchových normál na menší segmenty (menší rozpětí prostorových úhlů spadá do jednoho segmentu). Velikost segmentu bude dále předmětem testování a měl by tím být odstraněn i problém s polygony segmentu přesahujícími zorné pole skeneru.



Obr. 6-12 Nepoměr velikosti vytvořených segmentů

6.5.2 Výpočet map viditelnosti

Velkou část výpočetního času v přípravě pozic tvoří výpočet map viditelnosti (cca 70 – 85 %). Tento čas je navíc lineárně závislý na počtu polygonů použité sítě. V případě potřeby použití hustší sítě to zároveň znamená značný nárůst času.

Optimalizace

Ke zkrácení tohoto času by došlo při použití polygonální sítě s menší hustotou pouze pro výpočet map viditelnosti. Následná simulace, která ověřuje skutečnou viditelnost polygonů, by již probíhala na původní hustší síti.

6.5.3 Počet pozic měření (a možnosti jeho snížení)

Se současným řešením se podařilo u testovaných vzorků dosáhnout na počet pozic o (6,5 – 33) % vyšší než při ruční přípravě pozic. Vyšší počet pozic se projevil zejména při dělení sítě na vyšší počet polygonů a při použití sítě ze skenování fyzického dílu, což vedlo k přípravě pozic pro větší počet segmentů. Výsledné záběry se ale často alespoň částečně překrývají a přinášejí velmi málo nových naskenovaných dat.

Optimalizace

U vygenerovaných pozic dochází k průniku množin polygonů, které se z těchto pozic naskenují, a proto jsou některé pozice nadbytečné. Pokrytí dílu z určitého množství pozic je známý optimalizační problém označovaný jako Set Cover Problem (SCP). U tohoto problému je hladový algoritmus nejlepším řešením na obecný případ. Ve specifických případech jsou lepší jiná řešení. Problém s pokrytím všech polygonů dílu pohledy skeneru je však možné řešit mezi obecné případy.

Redukci pozic touto optimalizací bude nicméně možné použít až v případě, kdy bude dosažena vyšší shoda mezi simulací a reálným měřením.

6.5.4 Osvětlovací model

Použitý Nayarův osvětlovací model se v práci osvědčil. Především pak jeho implementace, která umožňuje výpočet expozičních časů, které mají být použity pro měření.

U provedených měření se vyskytl očekávaný problém s místy na měřeném dílu, kde mají plochy konvexní tvar. V těchto místech je naskenování velmi problematické

z důvodu vícenásobných odlesků světla (viz Obr. 6-13). Tento problém nelze vyřešit žádným osvětlovacím modelem, protože ten vícenásobné odlesky neřeší.

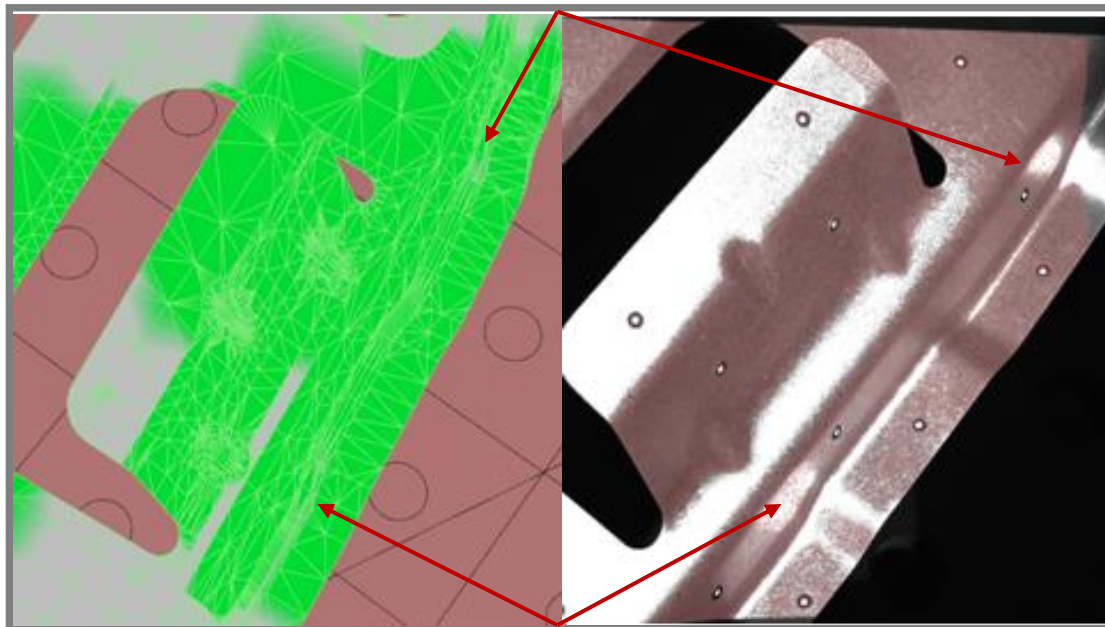
Vliv parametrů osvětlovacího modelu při použití na odlišný materiál se ukázal jako méně zásadní, než bylo předpokládáno. Zároveň bude zajímavé dále odvodit parametry pro materiály s jinou povrchovou úpravou (například elektrolyticky pozinkované) a porovnat vliv povrchové úpravy na tyto parametry.

Experimentálně odvozené hodnoty parametrů osvětlovacího modelu pro daný materiál se velmi liší od hodnot pro ocelový plech odvozených v článku [31]. Důvodem může být odlišný typ materiálu plechu nebo jiná povrchová úprava. U parametrů odvozených v této práci je mnohem výraznější špiče lesklého odrazu v porovnání s parametry odvozenými v uvedeném článku.

Optimalizace

V některých případech lze problém vícenásobných odlesků alespoň částečně řešit optimalizací navržené pozice. Dalším možným řešením je promítnutí světelného vzoru na část zakřivené plochy a následně ve stejné pozici na zbývající část. Odlišným řešením je pak využití metody sledování paprsku (ray tracing) a renderování scény z daného pohledu. Metoda sledování paprsku používaná pro přesné vykreslení scény je velmi časově náročná. Pro tuto aplikaci by však mohla být upravena, protože není nutné vykreslovat realisticky celou scénu, ale pouze určit příspěvky jasu z odlesků.

Přesnější vyhodnocení a optimalizace osvětlovacího modelu by mohla být provedena na základě porovnání hodnoty šedé ve skutečném snímku a v simulaci v místech, kde nedošlo k naskenování.



Obr. 6-13 Přesvětlená místa vzniklá vícenásobným odrazem

6.5.5 Referenční body na dílu

Nevýhodou v současném řešení je umístění referenčních bodů (kruhové kontrastní značky) na měřeném dílu. Tyto body slouží k zarovnání záběrů z jednotlivých pozic do jednoho souřadného systému a následně k vytvoření jedné polygonální sítě. V sériovém měření není možné body na každý měřený díl umisťovat. Velké množství referenčních bodů, použité při testovacích měřeních, bylo způsobeno použitím malého měřicího objemu. Na jeho použití se ale zároveň měl prokázat přínos nebo zhoršení v počtu vygenerovaných pozic.

Optimalizace

Problém referenčních bodů je možné vyřešit použitím upínacího rámečku, na kterém budou umístěny referenční body. Tento rámeček by bylo nutné v praxi použít i při ruční přípravě pozic. Do simulace by se následně přidal krok kontrolující viditelnost referenčních bodů (se známou polohou v modelu) z dané pozice.

6.5.6 Přesnost ustavení fyzického dílu

Zásadní vliv na přesnost simulace má správné ustavení měřeného dílu v porovnání s modelem. To se projevilo v odchylkách u zarovnání snímků v kapitole 6.2 a také u shody naskenované a simulované plochy polygonů popsané v kapitole 6.3.

Optimalizace

Problém přesného ustavení měřeného dílu je možné řešit vhodnou metodou kalibrace. Zvláště v případě použití měřicího rámečku, do kterého se bude umisťovat měřený díl (jak je popsáno v optimalizaci v kapitole 6.5.5), by bylo možné polohu tohoto rámečku (a referenčních bodů na něm) stanovit například na základě fotogrammetrického měření. To by bylo provedeno na robotu ve známé poloze a měřicího rámečku.

6.5.7 Řízení robota

Ve fázi automatického skenování (které již nebylo součástí samotné práce) je v současném řešení robot řízen zvláště z ovládacího panelu KUKA KCP2 a spouštění skenování z ovládacího počítače 3D skeneru. Pokud se v budoucnu podaří navržené řešení dopracovat a dovést do kompletní podoby i s automatickým skenováním, bylo by takové řešení nepoužitelné.

Optimalizace

Propojení řízení robota se samotným skenováním by bylo možné řešit pomocí toolboxu pro Matlab, KUKA Control Toolbox (KCT). Díky tomuto toolboxu by mělo být možné spojit dohromady příkazy pro přesun robota mezi jednotlivými pozicemi s příkazy pro samotné 3D skenování odesílané do softwaru ATOS Professional.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl *návrh metodiky automatizace procesu 3D digitalizace plechových dílů ve fázi generování měřicích pozic skeneru s využitím průmyslového robota*. Na základě rešeršní studie odborné literatury v dané problematice, byla vyhodnocena absence systému schopného automaticky navrhnout pozice měření pro tvarově složitější plechové díly na základě jejich CAD modelu, s vysokou přesností digitalizovat plochu celého měřeného dílu a simulací ověřit dostupnost pozic pro měření s robotem. K tomuto řešení byl zvolen dvoukamerový skener s proužkovou projekcí a pro simulaci skutečné viditelnosti byl aplikován Nayarův osvětlovací model. Ten ještě nebyl, alespoň podle dostupných zdrojů, aplikován na inspekci s využitím proužkové projekce. Jeho implementace však již byla ověřena na jiném typu inspekce. V první fázi práce byly navrženy a pomocí programovacího jazyka Python implementovány dílčí metody. Byla využita známá metoda map viditelnosti a dále byly navrženy a aplikovány vlastní metody pro segmentaci dílu, metriku hodnocení pozic a upraven byl algoritmus pro hledání nejkratší cesty robota založený na řešení TSP. Byl vytvořen kompletní software v podobě pluginu do softwaru Rhinoceros. Plugin umožňuje načtení měřeného dílu, vypočítání pozic měření, ověření viditelnosti části dílu simulací, kontrolu dostupnosti pozic měření s robotem a export kódu pro řízení robota a export expozičních časů použitých pro měření 3D skenerem.

Navržená *metodika byla experimentálně ověřena* pomocí měření dvou plechových dílů a s využitím 3D skeneru ATOS Triple Scan a průmyslového robota KUKA KR 60 HA. Pro ověření metodiky byly připraveny čtyři modely prvního dílu (Plech1) a dva modely druhého dílu (Plech2). Tyto modely se lišily v hustotě polygonální sítě a v případě dílu Plech1 v původu získaných dat. Dva modely vycházejí z CAD modelu a dva modely z naskenovaného fyzického dílu. Měření a zpracování naměřených dat probíhalo v softwaru ATOS Professional.

S využitím naměřených dat bylo provedeno *zhodnocení navržené metodiky* a posouzení vlivů na dosahované výsledky. Z posouzení časové náročnosti výpočtu pozic v porovnání s jejich ruční přípravou vyplývá, že navržené řešení přináší časovou úsporu v rozmezí (50 – 85) %. Čas výpočtu je závislý zejména na počtu polygonů použité sítě modelu a tato závislost je přibližně lineární. Z hlediska počtu připravených pozic měření bylo dosaženo hodnot o (6,5 – 33) % vyšších než při ruční přípravě. V ideálním případě to znamenalo nárůst pouze o dvě měřicí pozice. Byl prokázán vliv hustoty polygonální sítě na počet vygenerovaných pozic. U modelů dílu s vyšším počtem polygonů bylo vygenerováno o (9 – 21) % více pozic. Naopak vliv původu použité sítě (z CAD modelu a sítě ze skenování fyzického dílu) na počet pozic měření se výrazně neprojevil. U provedených experimentálních měření bylo dosaženo naskenování plochy dílu v odchylkách maximálně do 1 % z celkové plochy dílu. V ideálním případě se nenaskenovalo pouze 0,01 % plochy dílu. Pro ověření metodiky a konkrétně ověření shody simulace a skutečného měření byla dále posuzována shoda naskenované plochy z jednotlivých pohledů udávaná simulací a skutečně zaznamenaná při měření. Zde byla zjištěna shoda s odchylkami mediánu do 17 % v případě dílu Plech1 a odchylkami mediánu do 26 % u dílu Plech2. Větší odchylky v případě druhého dílu je možné připsat jinému typu materiálu, pro nějž přímo nebyly stanoveny parametry osvětlovacího modelu a na kterém se právě vliv těchto parametrů měl ověřit. Dále bylo zjištěno, že při měření

dle modelu získaného skenováním fyzického dílu bylo dosaženo větší shody naskenované plochy v simulaci a měření než v případě modelu z CAD. Tento závěr platí i pro různou hustotu sítě těchto modelů a rozdíl v mediánu těchto odchylek je (2,5 – 3,2) %. Potvrdil se předpoklad, že přesnější model (získaný skenováním fyzického dílu) má pozitivní vliv na shodu simulace s měřením. Kromě přímých výsledků efektivity navržené metodiky byla vyhodnocena také přesnost navržených pozic na základě shody snímků kamer získaných simulací a z měření. Zde byl posuzován posun snímků a odchylka ve velikosti těchto snímků. Zjištěný medián odchylek v posunu snímků i v jejich velikosti dosahuje maximálně hodnot 2 %. Tyto odchylky nemají zásadní vliv na přesnost simulace a jejich redukce by měla být možná vhodnou kalibrací pozice měřeného dílu. Hodnocena byla také navržená metoda segmentace. U ní se prokázaly odchylky ve schopnosti zaznamenat vybraný segment z příslušné pozice v hodnotě mediánu (8,8 – 15,8) %. Jedná se o poměrně dobrý výsledek, který bude ale cílem dále zlepšit například zmenšením vytvářených segmentů.

V rámci této dizertační práce bylo navrženo řešení, které rozšiřuje předchozí práce aplikací osvětlovacího modelu, stanovením expozičních časů skenování na základě simulace a simulací dostupnosti robota do pozic měření. Přínosem práce, v porovnání s ostatními dostupnými pracemi v této problematice, je dále porovnání simulace se skutečnými výsledky měření. Výsledky prokazují přínos navržené metodiky v přípravné fázi automatizované digitalizace plechových dílů.

Optimalizace v navržené metodice je dále možná a předpokládá se její realizace v oblasti kalibrace pozice měřeného dílu, segmentace měřeného dílu, zrychlení výpočtu map viditelnosti, zlepšení parametrů osvětlovacího modelu nebo případně implementace metody sledování paprsku a řízení robota přímo propojené se skenováním.

Všechny stanovené cíle práce byly splněny.

LITERATURA

- [1] NEWMAN, Timothy S. a Anil K. JAIN. A Survey of Automated Visual Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*. 1995, Vol. 61, issue 2, s. 231-262. ISSN 10773142. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S107731428571017X>
- [2] ELMARAGHY, H. a W. ELMARAGHY. Computer-Aided Inspection Planning (CAIP). SHAH, Jami J, Martti MÄNTYLÄ a Dana S NAU. *Advances in feature based manufacturing*. New York: Elsevier, 1994, s. 363-396. ISBN 0444816003.
- [3] SRINIVASAN, Vijay. Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends. *Computer-Aided Design*. 2008, Vol. 40, issue 7, s. 738-749. ISSN 00104485. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448507001546>
- [4] ISO 10303 STEP Standards. In: *STEP Tools, Inc.* [online]. © 2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.steptools.com/library/standard/>
- [5] LI, Yadong a Peihua GU. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*. 2004, Vol. 36, issue 13, s. 1395-1417. ISSN 00104485. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448504000430>
- [6] GAO, J., N. GINDY a X. CHEN. An automated GD&T inspection system based on non-contact 3D digitization. *International Journal of Production Research*. 2006, Vol. 44, issue 1, s. 117-134. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09638280500219737>
- [7] GOM GMBH. GOM Inspect Professional. In: GOM GMBH. *Optical Measuring Techniques: GOM* [online]. Braunschweig, 2005 [cit. 2014-08-23]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect-professional.html>
- [8] LUHMANN, Thomas. *Close range photogrammetry: principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1870325-50-9.
- [9] BELLOCCHIO, Francesco. *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches*. New York: Springer, c2013, 162 p. ISBN 978-1-4614-5632-2.
- [10] BATLLE, J., E. MOUADDIB a J. SALVI. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem. *Pattern Recognition*. 1998, Vol. 31, issue 7, s. 963-982. ISSN 00313203. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320397000745>
- [11] GORTHI, Sai Siva a Pramod RASTOGI. Fringe projection techniques: Whither we are?. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, Vol. 48, issue 2, s. 133-140. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816609002164>
- [12] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*. 2004, Vol. 37, issue 4, s. 827-849. ISSN 00313203. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320303003303>
- [13] GERIG, Guido. CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. *Structured Light II*

- [online]. 2012, 48 s. [cit. 22.8.2014]. Dostupné z: <http://www.sci.utah.edu/~gerig/CS6320-S2013/Materials/CS6320-CV-S2013-StructuredLight-II.pdf>
- [14] LUHMANN, Thomas. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2010, Vol. 65, issue 6, s. 558-569. ISSN 09242716. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271610000584>
- [15] MARTÍNEZ, Susana, Eduardo CUESTA, Joaquín BARREIRO a Braulio ÁLVAREZ. Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, Vol. 46, 5-8, s. 621-629. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2106-8>
- [16] MARTÍNEZ, S., E. CUESTA, J. BARREIRO a B. ÁLVAREZ. Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, Vol. 48, issue 12, s. 1238-1246. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816610001259>
- [17] BRAJLIH, Tomaz, Tadej TASIC, Igor DRSTVENSEK, Bogdan VALENTAN, Miodrag HADZISTEVIC, Vojko POGACAR, Joze BALIC a Bojan ACKO. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2011-11, Vol. 57, issue 11, s. 826-833. ISSN 00392480. Dostupné z: http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/11/05_2010_152_Brajlih_05.pdf
- [18] IULIANO, Luca, Paolo MINETOLA a Alessandro SALMI. Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers. *Measurement Science and Technology*. 2010-10, Vol. 21, issue 10, s. 105102. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/MST/21/105102>
- [19] BARBERO, Basilio Ramos a Elena Santos URETA. Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*. 2011, Vol. 43, issue 2, s. 188-206. ISSN 00104485. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448510002150>
- [20] KOZÁK, Jakub. *Testování parametrů základnových skenovacích systémů*. Praha, 2013. Dostupné z: <http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/dp/2013/jakub-kozak-dp-2013.pdf>. Diplomová. ČVUT v Praze.
- [21] TARABANIS, K.A., P.K. ALLEN a R.Y. TSAI. A survey of sensor planning in computer vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1995, Vol. 11, issue 1, s. 86-104. ISSN 1042296x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=345940>
- [22] BROWN, Gordon M.. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*. 2000-01, Vol. 39, issue 1, s. 10-22. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.602438>
- [23] SCOTT, William R., Gerhard ROTH a Jean-François RIVEST. View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection. *ACM Computing Surveys*. 2003-03, Vol. 35, issue 1, s. 64-96. ISSN 03600300.

- Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=641865.641868>
- [24] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG, Yifan CHEN a J.S. RANKIN. Automated CAD-guided automobile part dimensional inspection. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. San Francisco, CA: IEEE, 2000, s. 1157-1162. ISBN 0-7803-5886-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=844755>
- [25] RAFFAELI, Roberto, Maura MENGONI, Michele GERMANI a Ferruccio MANDORLI. Off-line view planning for the inspection of mechanical parts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2013, Vol. 7, issue 1, s. 1-12. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12008-012-0160-1>
- [26] GERMANI, Michele, Ferruccio MANDORLI, Maura MENGONI a Roberto RAFFAELI. CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering*. 2010, Vol. 34, issue 1, s. 7-15. ISSN 01416359. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635908001207>
- [27] LARTIGUE, Claire, Yann QUINSAT, Charyar MEHDI-SOUZANI, Alexandre ZUQUETE-GUARATO a Shadan TABIBIAN. Voxel-based Path Planning for 3D Scanning of Mechanical Parts. *Computer-Aided Design and Applications*. 2014-03, Vol. 11, issue 2, s. 220-227. ISSN 1686-4360. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16864360.2014.846096>
- [28] ELLENRIEDER, Marc M., Lars KRÜGER, Dirk STÖBEL a Marc HANHEIDE. A Versatile Model-Based Visibility Measure for Geometric Primitives. In: *Image Analysis: 14th Scandinavian Conference, SCIA 2005*. Joensuu, Finland: Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 669-678. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/11499145_68
- [29] STÖBEL, Dirk, Marc HANHEIDE, Gerhard SAGERER, Lars KRÜGER a Marc ELLENRIEDER. Feature and Viewpoint Selection for Industrial Car Assembly. *Pattern Recognition*. 2004, č. 3175, s. 528-535. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-28649-3_65
- [30] ELLENRIEDER, Marc M. a Hitoshi KOMOTO. Model-based automatic calculation and evaluation of camera positions for industrial machine vision. In: BOUMAN, Charles A. a Eric L. MILLER. *Computational Imaging III*. San Jose, CA, USA: SPIE, 2005, s. 467-478. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=858049>
- [31] ELLENRIEDER, Marc M., Christian WOHLER a Pablo D'ANGELO. Reflectivity function based illumination and sensor planning for industrial inspection. In: OSTEN, Wolfgang (ed.), Christophe GORECKI (ed.) a Erik L. NOVAK (ed.). *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*. Munich, Germany: SPIE, 2005, s. 89-98. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=866999>
- [32] AINSWORTH, Iain, Mihailo RISTIC a Djordje BRUJIC. Visual CAD-based measurement and path planning for free-form shapes. In: *7th International Conference in Central Europe: Computer Graphics, Visualisation and*

- Interactive Digital Media*. Prague, Czech Republic, 1999.
- [33] AINSWORTH, I., M. RISTIC, D. BRUJIC, B. GAÁL a T. VÁARADY. CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2000, Vol. 16, issue 1, s. 381-390.
- [34] ELKOTT, Diaa F., Hoda A. ELMARAGHY a Waguih H. ELMARAGHY. Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces. *International Journal of Production Research*. 2002, Vol. 40, issue 11, s. 2653-2676. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540210133435>
- [35] PRIETO, F., T. REDARCE, P. BOULANGER a R. LEPAGE. CAD-based range sensor placement for optimum 3D data acquisition. In: *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.PR00062)*. Ottawa, Ont.: IEEE Comput. Soc, 1999, s. 128-137. ISBN 0-7695-0062-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=805343>
- [36] PRIETO, Flavio, Richard LEPAGE, Pierre BOULANGER a Tanneguy REDARCE. Inspection of 3D parts using high accuracy range data. In: *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*. San Jose, CA, USA: SPIE, 2000, s. 82-93.
- [37] PRIETO, F., T. REDARCE, R. LEPAGE a P. BOULANGER. An Automated Inspection System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, Vol. 19, issue 12, s. 917-925. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s001700200104>
- [38] MARTINS, Fernando António Rodrigues, Jaime Gómez GARCÍA-BERMEJO, Eduardo Zalama CASANOVA a José. R. PERÁN GONZÁLEZ. Automated 3D surface scanning based on CAD model. *Mechatronics*. 2005, Vol. 15, issue 7, s. 837-857. ISSN 09574158. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415805000371>
- [39] MAHMUD, Mussa, David JOANNIC, Michaël ROY, Ahmed ISHEIL a Jean-François FONTAINE. 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Computer-Aided Design*. 2011, Vol. 43, issue 4, s. 345-355. ISSN 00104485. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448510002472>
- [40] GERMANI, Michele, Maura MENGONI a Roberto RAFFAELI. Automation of 3D view acquisition for geometric tolerances verification. In: *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops*. Kyoto: IEEE, 2009, s. 1710-1717. ISBN 978-1-4244-4442-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5457489>
- [41] RAFFAELI, Roberto, Maura MENGONI a Michele GERMANI. Context Dependent Automatic View Planning: The Inspection of Mechanical Components. *Computer-Aided Design and Applications*. 2013, Vol. 10, issue 1, s. 111-127. ISSN 1686-4360. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3722/cadaps.2013.111-127>
- [42] SHENG, Weihua, Ning XI, Jindong TAN, Mumin SONG a Yifan CHEN.

- Minimum viewpoint planning for dimensional inspection of sheet metal parts. In: *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*. IEEE, 2003, s. 1049-1054. ISBN 0-7803-7759-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1225487>
- [43] QUAN SHI, NING XI, WEIHUA SHENG a YIFAN CHEN. Development of dynamic inspection methods for dimensional measurement of automotive body parts. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. IEEE, 2006, s. 315-320. ISBN 0-7803-9505-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1641730>
- [44] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG a Yifan CHEN. CAD-guided sensor planning for dimensional inspection in automotive manufacturing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2003, Vol. 8, issue 3, s. 372-380. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1232297>
- [45] SHI, Quan, Ning XI, Heping CHEN a Yifan CHEN. Integrated Process for Measurement of Free-Form Automotive Part Surface Using a Digital Area Sensor. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005, s. 578-583. ISBN 0-7803-8914-x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1570180>
- [46] SHI, Quan, Ning XI a Weihua SHENG. Recursive Measurement Process for Improving Accuracy of Dimensional Inspection of Automotive Body Parts. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007, s. 4764-4769. ISBN 1-4244-0602-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4209831>
- [47] ZHANG, Yongjun, Zuxun ZHANG a Jianqing ZHANG. Deformation visual inspection of industrial parts with image sequence. *Machine Vision and Applications*. 2004, Vol. 15, issue 3, s. 115-120. ISSN 0932-8092. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00138-004-0136-7>
- [48] ZHANG, Yongjun, Zuxun ZHANG a Jianqing ZHANG. Automatic measurement of industrial sheetmetal parts with CAD data and non-metric image sequence. *Computer Vision and Image Understanding*. 2006, Vol. 102, issue 1, s. 52-59. ISSN 10773142. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314205001347>
- [49] YOUTUBE LLC. GOM Training Webinar: V8 Automation Workflows - What's New. In: YOUTUBE LLC. *YouTube* [online]. San Bruno, California, USA, © 2005 [cit. 2014-08-06]. Dostupné z: http://youtu.be/6irTHTRnn_c
- [50] GOM MBH. V8 - New Version of the 3D Digitizing and Inspection Software. In: GOM MBH. *Optical Measuring Techniques: GOM: Industrial 3D Measurement Techniques* [online]. Braunschweig, 2005 [cit. 2014-08-06]. Dostupné z: www.gom.com/news/latest-news/v8-new-version-of-the-gom-software.html
- [51] MANN, S. a R. W. PICARD. Being 'undigital' with digital cameras: Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures. In: *IS&T's 48th*

- annual conference, Cambridge, Massachusetts, May 1995. Cambridge, Massachusetts: Society for Imaging Science and Technology, 1995, s. 422-428.*
- [52] YAU, Shing-Tung a Song ZHANG. High dynamic range scanning technique. *Optical Engineering*. 2009-03, Vol. 48, issue 3, s. 033604-. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3099720>
- [53] SKOCAJ, D. a A. LEONARDIS. Range image acquisition of objects with non-uniform albedo using structured light range sensor. In: *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*. Barcelona: IEEE Comput. Soc, 2000, s. 778-781. ISBN 0-7695-0750-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=905506>
- [54] JIANG, Hongzhi, Huijie ZHAO a Xudong LI. High dynamic range fringe acquisition: A novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012, Vol. 50, issue 10, s. 1484-1493. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816612000978>
- [55] ZHAO, Huijie, Xiaoyue LIANG, Xiaochun DIAO a Hongzhi JIANG. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014, Vol. 54, s. 170-174. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816613002455>
- [56] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa G. NARASIMHAN. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination. In: *CVPR 2011*. Providence, RI: IEEE, 2011, s. 713-720. ISBN 978-1-4577-0394-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5995321>
- [57] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa G. NARASIMHAN. A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. *International Journal of Computer Vision*. 2013, Vol. 102, 1-3, s. 33-55.
- [58] PALOUŠEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNÝ, Josef BEDNÁŘ, Tomáš KOUTECKÝ a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2015.
- [59] VUKAŠINOVIĆ, Nikola, Drago BRAČUN, Janez MOŽINA a Jože DUHOVNIK. The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, Vol. 50, 1-4, s. 265-274. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2493-x>
- [60] COOK, R. L. a K. E. TORRANCE. A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics*. 1982, Vol. 1, issue 1, s. 7-24. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=357290.357293>
- [61] NAYAR, S.K., K. IKEUCHI a T. KANADE. Surface reflection: physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991, Vol. 13, issue 7, s. 611-634. ISSN 01628828. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=85654>

- [62] PHONG, Bui Tuong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*. 1975, Vol. 18, issue 6, s. 311-317. ISSN 00010782. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=360825.360839>
- [63] BECKMANN, Petr a André SPIZZICHINO. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Norwood: Artech House, 1987, viii, 503 s. ISBN 08-900-6238-2.
- [64] TORRANCE, K. E. a E. M. SPARROW. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. *Journal of the Optical Society of America*. 1967, Vol. 57, issue 9, s. 1105-. ISSN 0030-3941. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-57-9-1105>
- [65] ŽÁRA, Jiří, Bedřich BENEŠ, Jiří SOCHOR a Petr FELKEL. *Moderní počítačová grafika*. Vyd 1. Brno: Computer Press, 2004, 609 s. ISBN 80-251-0454-0.
- [66] WECKENMANN, Albert, Wito HARTMANN, Johannes WEICKMANN, Angela DUPARRÉ a Roland GEYL. Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. In: *Proc. SPIE 7102, Optical Fabrication, Testing, and Metrology III, 71020N*. Glasgow, Scotland, United Kingdom: SPIE, 2008. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=795982>
- [67] Ray tracing. SHIRLEY, Peter a Stephen Robert MARSCHNER. *Fundamentals of computer graphics*. 3rd ed. Natick, Mass.: A K Peters, c2009, s. 201-237. ISBN 978-1-56881-469-8.
- [68] KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Analysis of sheet metal parts behaviour during fringe projection based digitization. In: *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference MMK2013: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky*. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013, s. 3499-3508. ISBN 978-80-87952-00-9.
- [69] JOS. SCHNEIDER OPTISCHE WERKE GMBH. *Macro Lens: Apo-Componon 2.8/40* [online]. 2012, 3 s. [cit. 25.8.2014]. Dostupné z: http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_industrial_solutions/industrioptik/Unifoc_Lenses/V-Mount_Macro-Lenses/Apo-Componon_2.8-40.pdf
- [70] WIKIMEDIA FOUNDATION. Ortodroma. In: WIKIMEDIA FOUNDATION. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2013 [cit. 2014-07-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ortodroma>
- [71] VENESS, Chris. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. In: *Movable Type Scripts* [online]. 2002-2014 [cit. 2014-08-29]. Dostupné z: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [72] SHENG, Weihua, Ning XI, Mumin SONG a Yifan CHEN. Near-optimal-time path planning in CAD-guided part dimensional inspection. In: *Proceedings of the 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain, 2002, s. 21-21. Dostupné z: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/25656.html>
- [73] SHINTYAKOV, Dmitry. tsp-solver. In: *GitHub* [online]. 2011 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: <https://github.com/dmishin/tsp-solver>

- [74] DUNN, Enrique a Gustavo OLAGUE. Multi-objective Sensor Planning for Efficient and Accurate Object Reconstruction. In: RAIDL, Günther R.. *Applications of evolutionary computing: EvoWorkshops 2004: EvoBIO, EvoCOMNET, EvoHOT, EvoIASP, EvoMUSART, and EvoSTOC, Coimbra, Portugal, April 5-7, 2004. Proceedings* [online]. Berlin: Springer, 2004, s. 312-321 [cit. 2014-08-07]. ISBN 9783540246534.
- [75] QIAN, Xiaoping a Kevin G. HARDING. Computational approach for optimal sensor setup. *Optical Engineering*. 2003-05, Vol. 42, issue 5, s. 1238-1248. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.1566777>
- [76] BAJARD, Alban. Three-dimensional scanning of specular and diffuse metallic surfaces using an infrared technique. *Optical Engineering*. 2012-06, Vol. 51, issue 6, s. 063603. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.OE.51.6.063603>
- [77] Phong components version 4. In: *Wikipedia* [online]. 2006 [cit. 2014-08-17]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Phong_components_version_4.png
- [78] MERCANTE. How to prepare an object for scanning. In: *DAVID-Laserscanner Forum: Incredibly Low-Cost 3D Scanner for Everyone...* [online]. 2010 [cit. 2014-08-19]. Dostupné z: <http://forum.david-3d.com/viewtopic.php?p=12756#p12757>
- [79] GOM MBH. *ATOS Triple Scan: User Manual - Hardware* [online]. Mittelweg 7-8, Braunschweig, Germany, 2011 [cit. 2013-12-03].
- [80] Voxel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Voxel>
- [81] Exkluzivní disjunkce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Exkluzivn%C3%AD_disjunkce

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A ZNAČEK

3DM		formát souboru softwaru Rhinoceros
BRDF		dvousměrová odrazová distribuční funkce (Bidirectional Reflectance Distribution Function)
CAD		počítačově podporované navrhování (Computer Aided Design)
CCD		typ obrazového snímače (Charge-Coupled Device)
CVM		kombinovaná mapa viditelnosti (Combined Visibility Map)
CMM		souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)
GPS		geometrické specifikace produktu (Geometrical Product Specifications)
HDR		snímky s vysokým dynamickým rozsahem (High Dynamic Range)
HDRS		skenování s vysokým jasovým rozsahem (High Dynamic Range Scanning)
HDRFA		proužkové snímání s vysokým dynamickým rozsahem (High Dynamic Range Fringe Acquisition)
ICP		algoritmus přiblížení mraků bodů (Iterative Closest Point)
IGES		formát pro přenos CAD modelů (Initial Graphics Exchange Specification)
KCT		toolbox pro řízení robota z Matlabu (KUKA Control Toolbox)
MPEE		maximální dovolená chyba (Maximum Permissible Error)
NURBS		neuniformní racionální B-spline křivka (Non-uniform Rational B-Spline)
RPS		systém referenčních měřicích bodů (Reference Point System)
SCP		optimalizační problém množin (Set Cover Problem)
SDK		softwarový vývojářský balíček (Software Development Kit)
STEP		formát pro přenos CAD modelů a souvisejících informací (Standard for the Exchange of Product Model Data)
TSP		problém obchodního cestujícího (Traveling Salesman Problem)
VM		mapa viditelnosti (Visibility Map)
α	[°]	úhel mezi zdrojem světla a kamerou
β'_p	[-]	poměr mezi průměrem vstupní a výstupní pupily objektivu
β_n	[°]	ideální úhel mezi kamerou a normálou povrchu
δ	[°]	úhel mezi dvěma body na kulové ploše
θ	[°]	úhel elevace
ϑ_e	[°]	úhel mezi směrem kamery a normálou povrchu
ϑ_{e2}	[°]	úhel mezi směrem druhé kamery a normálou povrchu
ϑ_i	[°]	úhel mezi směrem zdroje světla a normálou povrchu
ϑ_r	[°]	úhel mezi směrem kamery a směrem maxima lesklého odrazu
κ	[mm]	clona
λ	[°]	směrník
ρ	[-]	albedo (koeficient difúzního odrazu)
σ_1	[-]	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
σ_2	[-]	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)
φ	[°]	úhel azimutu
a, b, c, d, e		váhové koeficienty

$CI_{\theta i}$	[°]	možný směr elevace první kamery
$CI_{\phi i}$	[°]	možný směr azimutu první kamery
$C2_{\theta i}$	[°]	možný směr elevace druhé kamery
$C2_{\phi i}$	[°]	možný směr azimutu druhé kamery
CI_{vis}	[-]	viditelnost z pozice první kamery
$C2_{vis}$	[-]	viditelnost z pozice druhé kamery
Cf_{vis}	[-]	koeficient viditelnosti
Cf_{θ}	[-]	koeficient shodné elevace kamery a projektoru
Cf_{obj_or}	[-]	koeficient orientace objektu
Cf_{seg_or}	[-]	koeficient orientace segmentu
$C2_{cam}$	[-]	koeficient orientace druhé kamery
Cf_{pos}	[-]	koeficient hodnocení vhodnosti dané orientace
Σd	[mm]	vzdálenost posledních optických ploch objektivu
d_0	[mm]	objektová vzdálenost
d_i	[mm]	obrazová vzdálenost
d_{pol}	[mm]	vzdálenost od zdroje světla k polygonu
d_t	[mm]	vzdálenost mezi objektem a obrazem
f'	[mm]	ohnisková vzdálenost
h_0	[mm]	velikost objektu
h_i	[mm]	velikost obrazu
HH'	[mm]	vzdálenost hlavních rovin
G_{ideal}	[-]	hodnota šedi pro maximální naskenování plochy
G_{min}	[-]	hodnota šedi pro minimální naskenování plochy (spodní hodnota)
G_{max}	[-]	hodnota šedi pro minimální naskenování plochy (horní hodnota)
G_{pol}	[-]	hodnota šedi polygonu
k_1	[-]	konstanta osvětlovacího modelu
K	[-]	konstanta osvětlovacího modelu
m_1	[-]	koeficient lesklého odrazu (lesklý lalok)
m_2	[-]	koeficient lesklého odrazu (lesklý hrot)
P_{vis}	[-]	viditelnost z pozice projektoru
$P_{\theta i}$	[°]	možný směr elevace projektoru
$P_{\phi i}$	[°]	možný směr azimutu projektoru
R	[-]	dvousměrná odrazová funkce
s'_{AP}	[mm]	pozice výstupní pupily
s_{EP}	[mm]	pozice vstupní pupily
s_F	[mm]	přední ohnisková vzdálenost
s'_F	[mm]	zadní ohnisková vzdálenost
t	[s]	expoziční čas
t_{pol}	[s]	expoziční čas potřebný pro ideální naskenování polygonu
t_{avg}	[s]	průměrný expoziční čas pro daný segment
z_{near}	[mm]	vzdálenost k přední rovině frusta
z_{far}	[mm]	vzdálenost k zadní rovině frusta

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Metody získání informace o tvaru objektu [9]	16
Obr. 2-2 Obecný vztah dvou optických senzorů [10]	17
Obr. 2-3 Princip funkce proužkové projekce [66]	17
Obr. 2-4 Princip kódování pomocí binárního kódu [13]	18
Obr. 2-5 Díly pro porovnání přesnosti CMM a laserového skeneru [16]	19
Obr. 2-6 Srovnání měření průměru ocelové koule pomocí CMM a ATOS II [17] ...	20
Obr. 2-7 Srovnání dat měření pomocí CMM a ATOS III [18]	20
Obr. 2-8 Plánování pozic v oblasti počítačového vidění [21]	22
Obr. 2-9 Segmentace pomocí dělení kulového prostoru [26]	24
Obr. 2-10 Segmentace pomocí dělení na voxely [27]	25
Obr. 2-11 Mapa viditelnosti pro bod tělesa ve středu jednotkové koule [30]	26
Obr. 2-12 Kombinovaná mapa viditelnosti v použití skeneru s proužkovou projekcí [25]	26
Obr. 2-13 Generování měřících bodů na základě lokální křivosti [32]	27
Obr. 2-14 Plochy použité pro testování vzorkovacích algoritmů [34]	28
Obr. 2-15 Vygenerované pohledy laserového skeneru pro jednotlivé plochy objektu [35]	29
Obr. 2-16 Strategie generování pozic pro ploché díly [25]	31
Obr. 2-17 Vypočítané měřící pozice a simulace měření [25]	32
Obr. 2-18 Snímek proužkové projekce se vznikajícím odleskem [43]	33
Obr. 2-19 Schéma inspekčního procesu se zpětnovazebným členem, který přidává potřebné pozice měření [43]	33
Obr. 2-20 Měřený plechový díl s viditelnými rekonstruovanými hranami [48]	34
Obr. 2-21 Virtuální místnost softwaru Inspect Professional V8 [49]	34
Obr. 2-22 Pozice vygenerované pro každý segment měřeného prvku [49]	35
Obr. 2-23 Možné pozice vygenerované pro všechny měřené prvky [49]	36
Obr. 2-24 Zredukované měřící pozice [49]	36
Obr. 2-25 Šachovnice s promítnutým vzorem s různými expozičními časy a výsledným obrazem [52]	38
Obr. 2-26 Měřený objekt, snímek s vysokým dynamickým rozsahem a výsledná hloubková mapa [54]	39
Obr. 2-27 Klasický binární kód a nové kódové vzory XOR-04 a maximum min-SW [56]	40
Obr. 2-28 Výsledky použité metody [56]	41
Obr. 2-29 Ukázka odpařování po nástřiku cyklododekanovým sprejem v průběhu 48 hodin [78]	42
Obr. 2-30 Relativní intenzita odraženého světla v závislosti na úhlu pozorování [59]	42
Obr. 2-31 Složky odrazu světla - ambientní, difuzní a lesklá [77]	43
Obr. 2-32 Model odrazivosti tvořený třemi složkami - difuzní, lesklým lalokem a hrotem [31]	45
Obr. 2-33 Parametry lesklého odrazu pro BRDF u ocelového plechu [31]	46
Obr. 2-34 Mapa viditelnosti s mapovanou BRDF; segmentovaná mapa odrazivosti; skutečný snímek kamery [31]	46
Obr. 2-35 Simulace a výsledek měření lesklého povrchu a osvětlení lesklé oblasti [66]	47

Obr. 5-1 Rozměr odečtený z posuvného měřítka v objektové vzdálenosti	51
Obr. 5-2 Parametry pro skenovací objemy skeneru ATOS Triple Scan [79].....	52
Obr. 5-3 Uspořádání měřicí aparatury pro zjištění parametrů osvětlovacího modelu	54
Obr. 5-4 Měření rovného plechu v úhlu 0° a časech expozice 4-512 ms; měření úrovně šedi.....	55
Obr. 5-5 Měření rovného plechu v úhlu 0° a časech expozice 4 - 512 ms; růžově jsou zvýrazněny naskenované body	57
Obr. 5-6 Proložení hodnot pro poměr naskenovaných bodů v závislosti na expozičním času; na obrázku pro hodnoty úhlu θ_i 40°	58
Obr. 5-7 Využívané knihovny a moduly a jejich vzájemné propojení.....	59
Obr. 5-8 Diagram vytvořeného softwaru.....	60
Obr. 5-9 NURBS reprezentace modelu měřeného dílu s Greville body a normálou v jednom bodě	61
Obr. 5-10 Model reprezentovaný polygonální sítí s vyznačenou normálou u jednoho polygonu	62
Obr. 5-11 Konvence úhlů elevace a azimutu.....	63
Obr. 5-12 Model měřeného dílu a jeho obálkový kvádr.....	63
Obr. 5-13 Obálkový kvádr tělesa rozdělený na krychle podle měřicího objemu skeneru.....	64
Obr. 5-14 Normály polygonální sítě v jedné z krychlí	64
Obr. 5-15 Segmentace podle normál; a) 1. segment; b) 2. - 5. segment; c) 6. segment	64
Obr. 5-16 Paprsky vyslané přes body na jednotkové kouli (viditelné jsou pouze paprsky protínající síť)	66
Obr. 5-17 Viditelnost bodu na kraji zorného pole a jeho pozorovací úhel.....	67
Obr. 5-18 Graficky znázorněná kombinovaná mapa viditelnosti v MATLABu	68
Obr. 5-19 Ortodroma - vzdálenost dvou bodů na kulové ploše [70].....	69
Obr. 5-20 Kombinovaná mapa viditelnosti s možnými orientacemi kamer a projektoru	70
Obr. 5-21 Model vybavení místnosti, ve které probíhá měření s robotem.....	72
Obr. 5-22 Nastavení báze robota	73
Obr. 5-23 3D skener upevněný pomocí vlastního držáku na robota	73
Obr. 5-24 Nastavení vlastního nástroje - skener ATOS	74
Obr. 5-25 Rozsahy os robota KUKA KR60HA nastavené v KUKA prc	75
Obr. 5-26 Frustum realizované pomocí Clipping Coordinates.....	77
Obr. 5-27 Znázornění přesunu mezi dvěma pozicemi po výpočtu nejkratší cesty.....	81
Obr. 5-28 Souřadný systém levé kamery se znázorněnými osami.	81
Obr. 5-29 Ukázka SRC souboru s kódem pro řízení robota.....	82
Obr. 5-30 Laboratoř D5/121 a vybavení pro skenování s robotem	84
Obr. 5-31 Místa uchycení plechového dílu (Plech1) a podoba přípravků pro jeho uchycení.....	85
Obr. 5-32 Umístění plechového dílu (Plech1) na stole pro obrábění	85
Obr. 5-33 Místa uchycení plechového dílu (Plech2) a podoba přípravků pro jeho uchycení.....	86
Obr. 5-34 Umístění plechového dílu (Plech1) na stole pro obrábění	86
Obr. 5-35 Srovnání CAD modelu (Plech1) a naskenovaného fyzického dílu.....	87
Obr. 5-36 Kuka Control Panel (KCP2)	88
Obr. 5-37 Porovnání smímků (P1_SKEN_10000, pozice 0, levá kamera)	89

Obr. 5-38 Porovnání polohy středů a velikostí reálného a simulovaného snímku	90
Obr. 5-39 Data pro pozici 0 získaná skenováním, zvýrazněna plocha polygonální sítě	91
Obr. 5-40 Data pro pozici 0 získaná v simulaci.....	91
Obr. 5-41 Polygonální sítě dílu Plech1 získané z CAD modelu (nahore) a ze skenování (dole).....	92
Obr. 5-42 Simulace naskenovaných polygonů na různě husté síti dílu	93
Obr. 5-43 Proces výběru polygonů segmentu, kde dochází k překryvu se skenovanými daty	94
Obr. 6-1 Naskenovaná data celého dílu pro P1_CAD_10000 s vyznačenými nedostatky v síti	97
Obr. 6-2 Nenaskenovaná místa v dílu P1_CAD_10000	98
Obr. 6-3 Odchyly v poloze středů snímků u měření dle modelu P1_CAD_10000 .	99
Obr. 6-4 Odchyly v poloze středů snímků u měření dle modelu P1_SKEN_10000	100
Obr. 6-5 Procentuální odchyly ve velikosti snímků u modelů P1_CAD_10000 a P1_SKEN_10000.....	101
Obr. 6-6 Odchyly v zaznamenané ploše v simulaci a v měření.....	103
Obr. 6-7 Malé a někdy chybně orientované polygony na okrajích dílu	104
Obr. 6-8 Rozdíl v simulované a skutečně naměřené ploše u dílu Plech2	105
Obr. 6-9 Rozdíl v simulované a naměřené ploše u dílu Plech1 v pozici 12	106
Obr. 6-10 Odchyly v zaznamenané ploše segmentů	107
Obr. 6-11 Nenaskenované části segmentu, způsobeno natočením skeneru.....	108
Obr. 6-12 Nepoměr velikosti vytvořených segmentů	109
Obr. 6-13 Přesvětlená místa vzniklá vícenásobným odrazem	110

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry přesnosti a rychlosti získání dat měření u vybraných inspekčních metod	18
Tabulka 2 Požadavky na systém plánování snímání [23].....	23
Tabulka 3 Výhody a nevýhody zmatňujících nástřiků	41
Tabulka 4 Optické parametry objektivu APO-Componon 2,8/40 [69]	51
Tabulka 5 Průměrná hodnota šedé.....	54
Tabulka 6 Parametry osvětlovacího modelu pro výpočet hodnoty šedé	55
Tabulka 7 Poměr naskenovaných bodů	57
Tabulka 8 Hodnoty šedé odpovídající úrovni naskenovaných dat a expozičním časům	58
Tabulka 9 Výpočet průsečíku paprsku s polygonální sítí.....	66
Tabulka 10 Parametry nutné pro vytvoření frusta	77
Tabulka 11 Parametry osvětlovacího modelu použité ve výpočtu expozičního času a hodnoty šedé	79
Tabulka 12 Porovnání zarovnání skutečné báze robota s modelem.....	84
Tabulka 13 Modely použitých plechových dílů	87
Tabulka 14 Parametry ruční přípravy pozic pro měření dílu Plech1	95
Tabulka 15 Výsledné parametry automatického generování pozic	96
Tabulka 16 Porovnání plochy celého dílu (modelu) a plochy naskenované	97
Tabulka 17 Výsledky porovnání poloh středů snímků. Výsledky v [%].....	100
Tabulka 18 Výsledky porovnání velikostí snímků. Výsledky v [%].....	102
Tabulka 19 Výsledky porovnání zaznamenané plochy. Výsledky v [%].....	102
Tabulka 20 Výsledky porovnání zaznamenání polygonů segmentu z příslušné pozice v [%]	106

PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Analysis of sheet metal parts behaviour during fringe projection based digitization. In: *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference MMK2013: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky*. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013, s. 3499-3508. ISBN 978-80-87952-00-9.

PALOUŠEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNÝ, Josef BEDNÁŘ, Tomáš KOUTECKÝ a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2015. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020.

SEZNAM PŘÍLOH

Plocha polygonů získaná simulací a měřením	130
Úroveň zaznamenání plochy segmentů	131

Plocha polygonů získaná simulací a měřením

Data pro měření dle modelu P1_CAD_30000

Měření	Simulace [mm ²]	Změřeno [mm ²]	Rozdíl [mm ²]	Procentuální rozdíl [%]	Procentuální rozdíl abs. [%]
0	19557,97	15086,5	4471,47	29,64	29,64
1	5433,03	6415,07	-982,04	-15,31	15,31
2	15298,17	12665,7	2632,47	20,78	20,78
3	13995,74	9716,29	4279,45	44,04	44,04
4	11593,59	8041,89	3551,70	44,17	44,17
5	22859,56	18603,5	4256,06	22,88	22,88
6	17629,40	15123	2506,40	16,57	16,57
7	19100,93	16118,1	2982,83	18,51	18,51
8	11674,51	10424,2	1250,31	11,99	11,99
9	22664,39	21072,8	1591,59	7,55	7,55
10	12668,98	11888,8	780,18	6,56	6,56
11	7013,58	13199,9	-6186,32	-46,87	46,87
12	3643,43	4143,91	-500,48	-12,08	12,08
13	9443,29	11533,9	-2090,61	-18,13	18,13
14	21460,90	20709,6	751,30	3,63	3,63
15	14564,92	9914,52	4650,40	46,90	46,90
16	7336,71	7444,09	-107,38	-1,44	1,44
17	12919,03	11982,3	936,73	7,82	7,82
18	19023,28	17072,8	1950,48	11,42	11,42
19	9535,11	7756,2	1778,91	22,94	22,94
20	10098,12	8313,92	1784,20	21,46	21,46
21	17493,30	14043,4	3449,90	24,57	24,57
22	10268,92	11101,3	-832,38	-7,50	7,50
23	14601,68	14958,2	-356,52	-2,38	2,38
24	3568,49	6700,85	-3132,36	-46,75	46,75
25	11898,70	10166,9	1731,80	17,03	17,03
26	17844,07	15378,4	2465,67	16,03	16,03
27	14069,62	9669,6	4400,02	45,50	45,50
28	12529,19	10590,2	1938,99	18,31	18,31
29	15273,25	14277,6	995,65	6,97	6,97
30	13719,53	10984,9	2734,63	24,89	24,89
31	12571,30	10845,8	1725,50	15,91	15,91
32	3853,23	6423,9	-2570,67	-40,02	40,02
33	5606,32	4423,46	1182,86	26,74	26,74
34	15998,00	14726,1	1271,90	8,64	8,64
35	16056,99	14740,1	1316,89	8,93	8,93
36	8406,91	8649,73	-242,82	-2,81	2,81
celý díl	124750,50	123631	1119,5	0,91	0,91

Úroveň zaznamenání plochy segmentů

Data pro měření dle modelu P1_SKEN_10000

Měření	Plocha segmentu [mm ²]	Naměřená plocha segmentu [mm ²]	Rozdíl [mm ²]	Procentuální rozdíl [%]
0	10202,00	8090,96	2111,04	20,69
1	265,70	258,52	7,18	2,70
2	13196,30	11034,90	2161,40	16,38
3	151,20	113,60	37,60	24,87
4	130,47	99,08	31,39	24,06
5	16021,40	9918,20	6103,20	38,09
6	1285,47	1231,26	54,21	4,22
7	16223,90	14406,40	1817,50	11,20
8	41,51	32,21	9,30	22,39
9	154,93	139,13	15,80	10,20
10	1028,53	975,88	52,65	5,12
11	14623,90	12114,80	2509,10	17,16
12	77,86	61,89	15,97	20,51
13	1002,95	609,60	393,35	39,22
14	120,03	110,61	9,41	7,84
15	12789,40	10080,70	2708,70	21,18
16	9,20	7,75	1,46	15,82
17	118,37	85,62	32,75	27,67
18	6002,32	4646,85	1355,47	22,58
19	7006,15	6567,07	439,08	6,27
20	4512,22	4051,01	461,21	10,22
21	2809,48	2677,02	132,46	4,71
22	2471,61	2361,16	110,45	4,47
23	3254,81	2964,20	290,61	8,93
24	5631,97	5338,55	293,42	5,21
25	4680,82	4433,36	247,46	5,29
26	94,90	60,72	34,18	36,01
27	45,82	1,51	44,32	96,71
28	289,33	281,89	7,44	2,57
29	67,19	66,40	0,79	1,17
30	103,26	78,96	24,30	23,53
31	97,84	97,84	0,00	0,00
32	82,67	56,90	25,76	31,17

